

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Rakennus- ja maanmittaustekniikan osasto
Betoniteknikka

HANNU RAHIKAINEN

HIEKON HIEKAN KÄYTTÖ VALMISBETONISSA

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä
tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkin-
toa varten

Espoossa 4.11.1992

Työn valvoja: Prof. Vesa Penttala

Työn ohjaajat: Dipl.ins. Petri Mattila

Dipl.ins. Kari Sivula

Tekijä ja työn nimi : Hannu Rahikainen

Hienon hiekan käyttö valmisbetonissa

Päivämäärä : 4.11.1992

Sivumäärä : 77

Osasto : Rakennus- ja maanmittaustekniikan
osasto

Professuuri : Rak-82
Betonitekniikka

Työn valvoja : Professori Vesa Penttala

Työn ohjaaja : DI Petri Mattila
DI Kari Sivula

Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää hienojen hiekkalajitteiden käyttömahdollisuudet rakennebetonien K30 ja K50, lattiabetonin K30 sekä huokostetun betonin K30 runkoaineena. Työssä tarkastellut lajitteet olivat luonnon 0-2 mm hiekka, luonnon 0-2 mm hiekka, johon oli lisätty 20 % filleriä, pesty luonnon 0-2 mm hiekka, salaojasoran alite 0-2 mm sekä pesty kivituhka 0-6 mm.

Kirjallisuusosassa selvitettiin lyhyesti hienojen lajitteiden vaikutukset betonin ominaisuuksiin.

Kokeellinen osa jakaantui laboratorio- ja työmaakokeisiin. Laboratoriossa tutkittiin eri lajitteiden fysikaaliset ominaisuudet sekä niiden käytön vaikutukset betonin ominaisuuksiin. Pestyä kivituhkaa lukuunottamatta kaikki tutkimuksen lajitteet soveltuvat sellaisenaan betonin hienoksi runkoaineeksi. Pestyllä hiekalla vedentarve oli muita pienempi ja salaojasoran alitteella muita suurempi. Puristuslujuuksissa ei havaittu suuria eroja eri lajitteita käytettäessä. Työmaakokeissa selvitettiin parhaiden lajitteiden käyttökelpoisuus huokostetussa betonissa ja lattiabetonissa.

Pestyä luonnon hiekkaa käytettäessä betonin valmistuskustannukset alenivat kaikilla betonityypeillä. Muilla hienoilla hiekoilla betonin valmistuskustannukset olivat joko samat tai alemmat kuin vertailuhiekalla tehdyissä betoneissa.

Author and name of the thesis : Hannu Rahikainen
The use of fine sand in ready-mixed concrete

Date : 4.11.1992

Number of pages : 77

Faculty : Faculty of Civil Engineering and
Surveying

Professorship :
Concrete Technology

Supervisor : Professor Vesa Penttala

Instructor : M.Sc (Civ.Eng.) Petri Mattila
M.Sc (Civ.Eng.) Kari Sivula

The aim of this study was to investigate the possibilities of using fine sand in ready-mixed concrete. The study included five different types of sand: natural sand 0-2 mm, natural sand 0-2 mm with 20 % filler, washed natural sand 0-2 mm, the production waste of drainage sand and washed crushed rock sand.

In the literature study the effects of fine sand in concrete were studied.

The experimental part was divided into laboratory and site tests. The physical properties of sands were investigated. Also the effects of using fine sands were studied in the laboratory tests. All of the sands investigated, except the washed crushed rock sand, proved to be good fine aggregate for concrete. The water demand was highest in concretes made with the production waste of drainage sand and lowest in concretes made with washed natural sand. No significant differences could be observed in compression strengths when using different types of sand. In site tests the properties of concrete made with fine sand were studied in practise.

The production costs of concrete made with washed natural sand 0-2 mm were lower than with comparison sand. In concretes made with other types of fine sand the production costs were the same or lower than with the comparison sand.

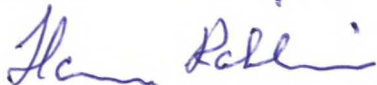
ALKULAUSE

Tämän diplomityön tarkoituksena oli selvittää hienojen hiekkalajitteiden käyttömahdollisuuksia valmisbetonin runkoaineena. Tutkimus on tehty Lohja Oy Ab:n toimeksiannosta.

Laboratoriokokeet tehtiin Lohja Oy Ab:n Konalan ja Virkkalan laboratorioissa ja työmaakokeet Kaukalahden valmisbetonitehtaalla, joiden henkilökunnalle suuri kiitos työni avustuksesta.

Työni valvonnasta haluan esittää kiitokseni professori Vesa Penttalalle sekä ohjauksesta dipl.ins Petri Mattilalle, dipl.ins Kari Sivulalle, dipl.ins. Erkki Kantaselle ja dipl.ins Martti Kärkkäiselle, jotka ovat antaneet mahdollisuuden itsenäiseen työskentelyyn hyvän keskinäisen luottamuksen vallitessa.

Espoossa 4.11.1992

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Hannu Rahikainen'.

Hannu Rahikainen

ALKUSANAT

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO	3
2 TEHTÄVÄN RAJAUS	4
3 HIEKON HIEKAN OMINAISUUDET	5
3.1 Rakeisuus	5
3.2 Ominaispinta-ala	5
3.3 Raemuoto	7
3.4 Puhtaus	7
4 HIEKON HIEKAN VAIKUTUS BETONIN OMINAISUUKSIIN . .	9
4.1 Hienofillerin vaikutukset	9
4.1.1 Tuoreen massan ominaisuudet	9
4.1.2 Kovettuneen massan ominaisuudet . .	17
4.2 Karkean fillerin vaikutukset betonin omi- naisuuksiin	22
5 HIEKON RUNKOAINEEN MUODON VAIKUTUKSET BETONIN OMINAI- SUUKSIIN	24
6 TUTKIMUSOHJELMA	26
7 HIEKKAKOKEET	28
7.1 Tutkittavat hiekat	28
7.2 Rakeisuus	30
7.3 Raemuoto	34
7.4 Puhtaus	37
8 BETONIKOKEET	38
8.1 Materiaalitiedot	38
8.2 Betonimassan valmistus ja massakokeet .	38
8.3 Koekappaleiden valmistus, säilytys ja tes-	

taus	39
9 RAKENNEBETONI K30	40
9.1 Betonimassan ominaisuudet	41
9.2 Kovettuneen betonin ominaisuudet	42
9.3 Koetulosten tarkastelu	43
10 JATKOKOKEET ERI MASSATYYPEILLÄ	46
10.1 Lattiabetoni K30	46
10.1.1 Betonimassan ominaisuudet	48
10.1.2 Kovettuneen betonin ominaisuudet	48
10.1.3 Koetulosten tarkastelu	50
10.2 Huokostettu betoni K30	51
10.2.1 Betonimassan ominaisuudet	52
10.2.2 Kovettuneen betonin ominaisuudet	52
10.2.3 Koetulosten tarkastelu	55
10.3 Rakennebetoni K50	57
10.3.1 Betonimassan ominaisuudet	58
10.3.2 Kovettuneen betonin ominaisuudet	58
10.3.3 Koetulosten tarkastelu	60
11 TYÖMAAKOKEET	62
11.1 Materiaalitiedot	62
11.2 Betonikokeet	63
11.3 Lattiabetoni K30	64
11.3.1 Betonimassan ominaisuudet	65
11.3.2 Kovettuneen betonin ominaisuudet	66
11.3.3 Koetulosten tarkastelu	66
11.4 Huokostettu betoni K30	67
11.4.1 Betonimassan ominaisuudet	67
11.4.2 Kovettuneen betonin ominaisuudet	68
11.4.3 Koetulosten tarkastelu	68
12 TALOUDELLISUUSVERTAILU	70
13 YHTEENVETO	74

KIRJALLISUUSLUETTELO

LIITTEET

1 JOHDANTO

Betonin tilavuudesta on runkoainetta 60-70 %. Betoneissa käytettävästä runkoaineesta on betonityypistä riippuen 30-70 % hienoa runkoainetta eli yleensä hiekkaa. Etelä-Suomessa suurten kaupunkien lähellä sijaisevilla hiekanottopaikoilla 0-4 mm ja 0-8 mm hiekkalajitteiden varannot pienenevät huomattavasti lähitulevaisuudessa. Nykyisillä hiekanottopaikoilla on kuitenkin runsaasti nykyisin vähän käytössä olevaa 0-2 mm hiekkaa. Hienon hiekan korkeilla hienoainepitoisuuksilla sekä suurella epäjatkuvuusvälillä on huomattavat vaikutukset sekä tuoreen että kovettuneen betonin ominaisuuksiin. Tämän tutkimuksen tavoitteena on selvittää erilaisten 0-2 mm hiekkalajitteiden käytön mahdollisuudet valmisbetonteollisuudessa. Tavoitteena oli myös selvittää, voidaanko betonin valmistuskustannuksia alentaa käyttämällä 0-2 mm lajitteita.

2 TEHTÄVÄN RAJAUS

Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin pääasiassa luonnon hiekkojen eri lajitteita: luonnon 0-2 mm hiekka, luonnon 0-2 mm hiekka, johon lisättiin 20 % filleriä, pesty 0-2 mm hiekka sekä salaojasoran alite. Ainoaksi murskatuksi lajitteeksi valittiin pesty kivituhka, joka oli rakeisuudeltaan 0-6 mm.

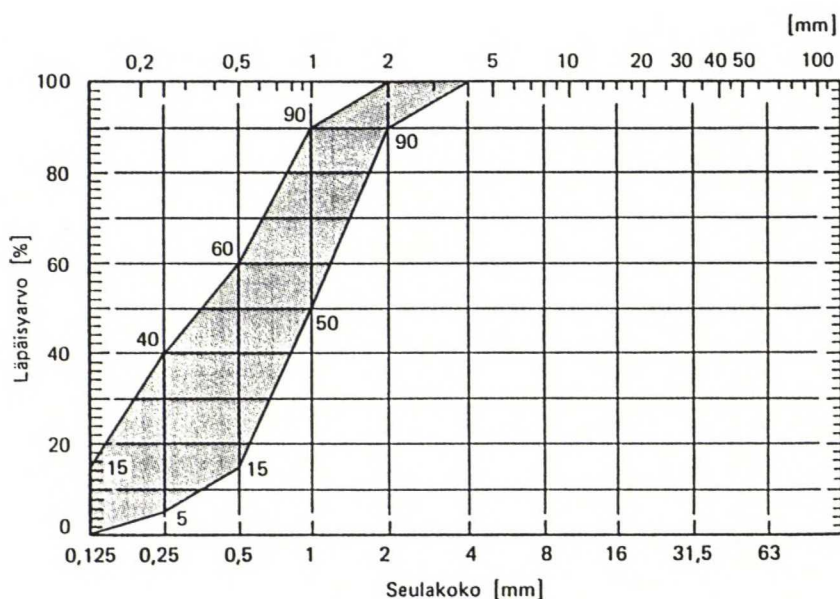
Betonikokeissa tutkittiin eri lajitteiden vaikutuksia rakenebetonien K30 ja K50, lattiabetonin K30 ja huokostetun betonin K30 betonimassan työstettävyyssominaisuuksiin. Kovetuneen betonin kokeissa tutkittiin eri lajitteiden vaikutuksia puristuslujuuksiin sekä huokostetulla betonilla lisäksi pakkassuolakestävyyteen. Huokostetussa betonissa käytettiin huokostinta, muissa betoneissa lisäaineita ei käytetty.

Kokeissa karkeana runkoaineena käytettiin 4-8 mm sekä 8-16 mm soraa, joten yhdistetty runkoaine kaikissa kokeissa oli epäjatkuvuusaukolla 2-4/2-8 mm. Jatkuvarakeisella runkoaineella ei kokeita tehty.

3 HIENON HIEKAN OMINAISUUDET

3.1 Rakeisuus

Betonin kiviainesohjeet /1990/ määrittelevät 0-2 mm hiekan rakeisuusalueen sekä suurimmat vaihteluvälit kullekin seulakoolle. Kuvassa 1 on esitetty 0-2 mm lajitteen rakeisuusalue ja taulukossa 1 sallitut vaihteluvälit eri seulakoolle.



Kuva 1. 0-2 mm lajitteen rakeisuusalue.

Taulukko 1. 0-2 mm lajitteen sallitut vaihteluvälit.

seulakoko (mm)	0.125	0.25	0.5	1	2
sallittu vaihteluväli (%)	10	15	10	6	4

3.2 Ominaispinta-ala

Ominaispinta-alalla tarkoitetaan rakeisen aineen paino- tai tilavuusyksikön sisältämien rakeiden yhteenlaskettua pinta-alaa. Ominaispinta-ala on riippuvainen rakeiden raemuodosta sekä läpimitasta. Ominaispinta-alan määrittämiseen käytetään

erilaisia menetelmiä, joiden tulokset poikkeavat selvästi toisistaan. Yleisimmät menetelmät ovat typpiadsorptio- ja virtausvastusmenetelmät sekä matemaattinen menetelmä.

Erään matemaattisen menetelmän mukaan voidaan säännöttömän kappaleen ominaispinta-ala laskea yhtälöstä

$$A = q * 6/x \text{ cm}^2/\text{cm}^3, \text{ missä}$$

A on ominaispinta-ala

q on raemuototekijä

x on kappaleen raekoko määritettynä samanpainoisen ja samasta aineesta olevan pallon läpimittana (cm)

Taulukossa 2 on esitetty muutamien lajitteiden ominaispinta-alat edelläolevan yhtälön avulla olettaen, että kaikki rakeet ovat yhtä suuria palloja. /Poijärvi,1966/

Taulukko 2. Eräiden lajitteiden ominaispinta-aloja.

x mm	cm ² /cm ³
8	7.5
2	30.0
0.5	120.0
0.125	480.0
0.001	60 000.0
0.0001	600 000.0

Luvut osoittavat, että yli 0.125 mm rakeiden ominaispinta-ala on melko pieni. Näin ollen hienofilleri, sementti ja lentotuhka määräävät betonin rakeisen aineksen ominaispinta-alan suuruuden.

Veden tehtävänä on kastella kaikki rakeet ja tehdä massa

työstettäväksi. Tämän vuoksi hienofillerillä on suuren pinta-alansa takia keskeinen veden vaikutuksia säätelevä merkitys. Vaikutukset kohdistuvat erityisesti massan työstettävyyteen ja vedenerottumiseen. /Poijärvi, 1966/

3.3 Raemuoto

Kiviaineksen raemuodolla on keskeinen merkitys betonin vedentarpeeseen, notkeuteen ja lujuuteen. Litteät, pitkänomaiset, rosoiset ja kulmikkaat rakeet tekevät betonimassan vaikeasti muokkautuvaksi. Tämän parantamiseksi on lisättävä vesimäärää ja vaaditun lujuuden saavuttamiseksi myös sementtimäärää, jolloin työstettävyyttä heikentävien rakeiden välinen etäisyys kasvaa.

Wills /1967/ on laajoissa tutkimuksissaan todennut, että hienon runkoaineen vaikutus vedentarpeeseen on selvästi suurempi kuin karkean. Neljän prosentin tyhjätilan kasvu hienossa runkoaineseoksessa aiheutti 2-3 kertaa suuremman vedentarpeen lisäyksen kuin vastaava tyhjätilan kasvu karkeassa runkoaineseoksessa.

3.4 Puhtaus

Hienot runkoaineet sisältävät epäpuhtauksia, jotka yleensä heikentävät betonin ominaisuuksia. Yleisimmät epäpuhtaudet ovat humus, savi ja kiille.

Humuksella tarkoitetaan maaperän sisältämiä kasvien ja eliöitten maatumisjäänteitä. Betonin kiviainesohjeiden 1990 mukaan humuskokeella todettu kiviaineksen humuspitoisuus saa vastata enintään humusastetta I. Eräät haitalliset humushapot eivät värjää humuskokeessa NaOH-liuosta, mutta käytännössä koe on osoittanut antavansa varsin luotettavan kuvan kiviaineksen käyttökelpoisuudesta.

Savilajitteeksi sanotaan ainesta, joka on hienojakoisempaa kuin $2\mu\text{m}$. Savi on yleensä runkoaineen joukossa lujina kasautumina tai runkoaineen pinnassa, jolloin se heikentää tartuntaa runkoaineen ja sementtiliiman välillä.

Kiilteillä on suomumainen rakenne ja yksi hyvin selvä lohko-suunta. Tämän vuoksi kiilteet lohkeilevat ohuiksi levyiksi, jotka ovat taipuisia ja kimmoisia. Kiilteellä on savien tapaan betonin ominaisuuksia heikentävä vaikutus. /Poijärvi, 1966/

4 HIEKON HIEKAN VAIKUTUS BETONIN OMINAISUUKSIIN

4.1 Hienofillerin vaikutukset

Seuraavassa on käsitelty hiekan alle 0.125 mm lajitteen vaikutuksia keskeisimpiin sekä betonimassan että kovettuneen betonin ominaisuuksiin.

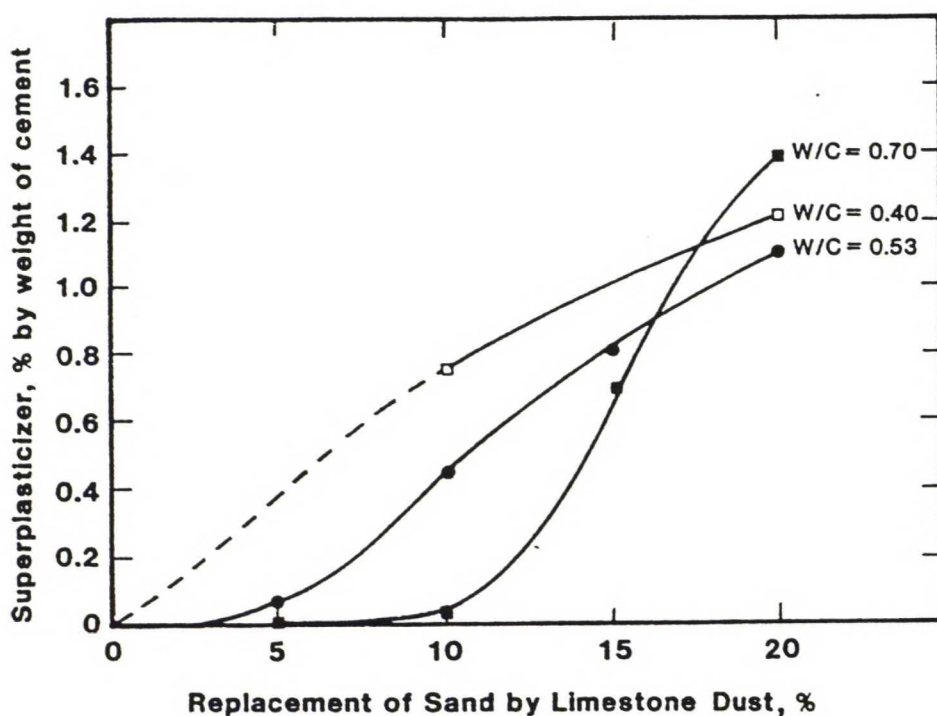
4.1.1 Tuoreen massan ominaisuudet

Työstettävyys ja vedentarve

Työstettävyys on betonimassan tiivistyvyyden ja notkeuden yhteisnimitys. Työstettävyyden on oltava käytettävän työta-
van mukainen siten, ettei betoniin jää onteloita ja pinta
tasoittuu tiivistämisen jälkeen. Betonin on myös täytettävä
tarkoin muotit ja ympäröi teräkset. Työstettävyyteen vaikut-
taa betonin aineosien keskinäisten suhteiden lisäksi runko-
aineen laatu. Näitä runkoaineen laatutekijöitä ovat rakei-
suus, raemuoto ja pinnan laatu. /RIL 119, 1979/

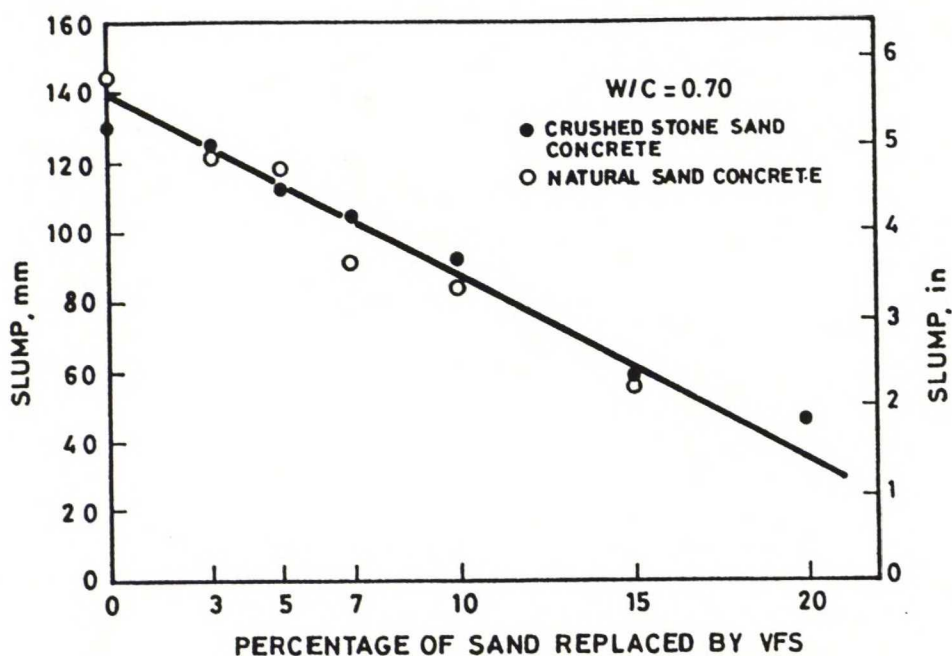
Poijärven mukaan vedentarve ei lisäännä lineaarisesti hienon
hiekan ominaispinta-alan suhteessa, vaan on melko vakio laa-
jalla alueella ja on enemmän riippuvainen sementin ja hieno-
aineen yhteisestä ominaispinta-alasta. /Poijärvi, 1966/

Samansuuntaiseen tulokseen päädyttiin kanadalaisessa tutki-
muksessa. Sen mukaan korkealla vesisementtisuhteella 0.70
notkeus pieneni vasta korvattaessa 10 % hiekasta kalkkikivi-
fillerillä. Yli 10 % fillerimäärillä tehonotkistinannostusta
jouduttiin kasvattamaan selvästi notkeuden säilyttämiseksi
kuvan 2 mukaisesti. Alemmilla vesisementtisuhteilla jo pie-
netkin fillerimäärät kasvattivat notkistinannostusta. Tut-
kimuksen mukaan laihat massat, joissa käytettiin kalkkikivi-
filleriä olivat paremmin koossapysyviä kuin vertailumassat.
/Malhotra & Carette, 1985/

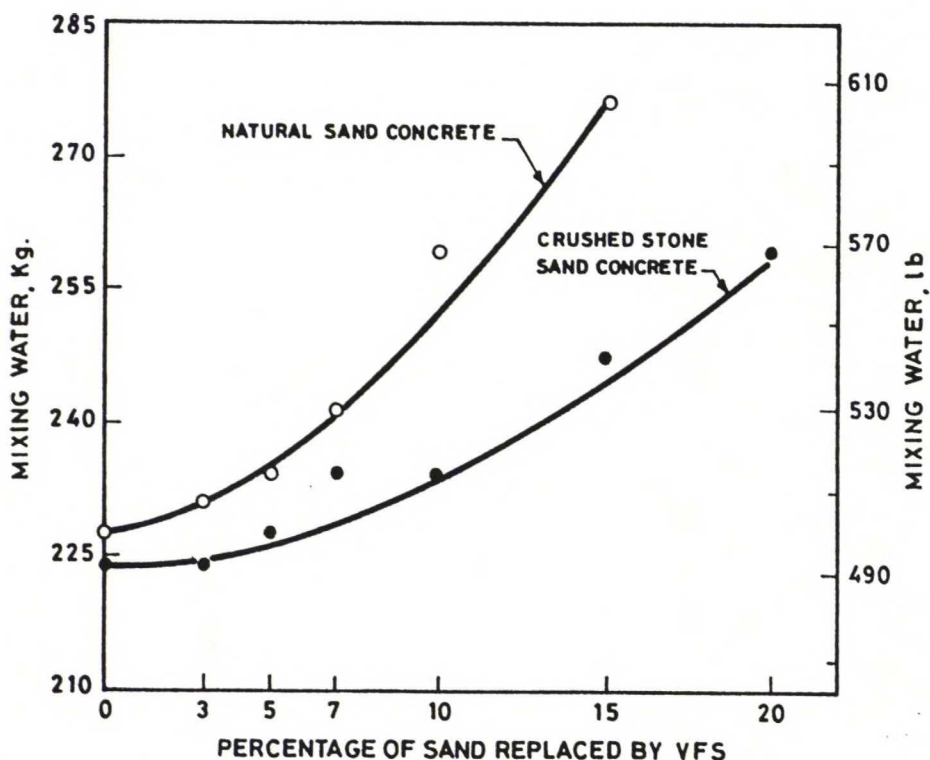


Kuva 2. Tehonotkistinannostus vakiopainumalla korvattaessa osa hiekasta kalkkikivipölyllä eri vesisementtisuhteilla. /Malhotra & Carette, 1985/

Ahmedin ja El-Kourdin mukaan painuma pienenee lineaarisesti korvattaessa hiekkaa luonnon- tai murskefillerillä kuvan 3 mukaisesti. Kuvan 4 mukaan vedentarve kasvaa heti lisättäessä hienoainesta. Luonnonfillerillä vedentarpeen kasvu on murskefilleriä suurempi. Tämä johtui luonnon hiekan suuremmasta adsorptiosta, ominaispinta-alasta savipitoisuudesta. Myös heidän mukaansa hienoaineksen lisääminen parantaa koossapysyvyyttä. /Ahmed & El-Kour, 1989/



Kuva 3. Painuman muuttuminen hienofillerimäärien suhteen betoneilla, joiden vesisementtisuhte on 0.70. /Ahmed & El-Kour, 1989/



Kuva 4. Vedentarpeen riippuvuus hienoainesmäärästä va-kiopainumalla 100 mm. /Ahmed & El-Kour, 1989/

Myös Banfillin ja Carrin /1987/ sekä Järven /1991/ tutkimusten mukaan vedentarve lisääntyy hienoainesmääriä kasvatettaessa. Järven mukaan pienillä vesisementtisuhteilla vedentarpeen kasvu on suhteellisesti voimakkaampaa kuin suurilla vesisementtisuhteilla.

Epäjatkuvarakeisella runkoaineella hienoaineksen osuuden lisääminen ei heikennä työstettävyyttä yhtä paljon kuin jatkuvarakeisella runkoaineella. /Neville, 1981/

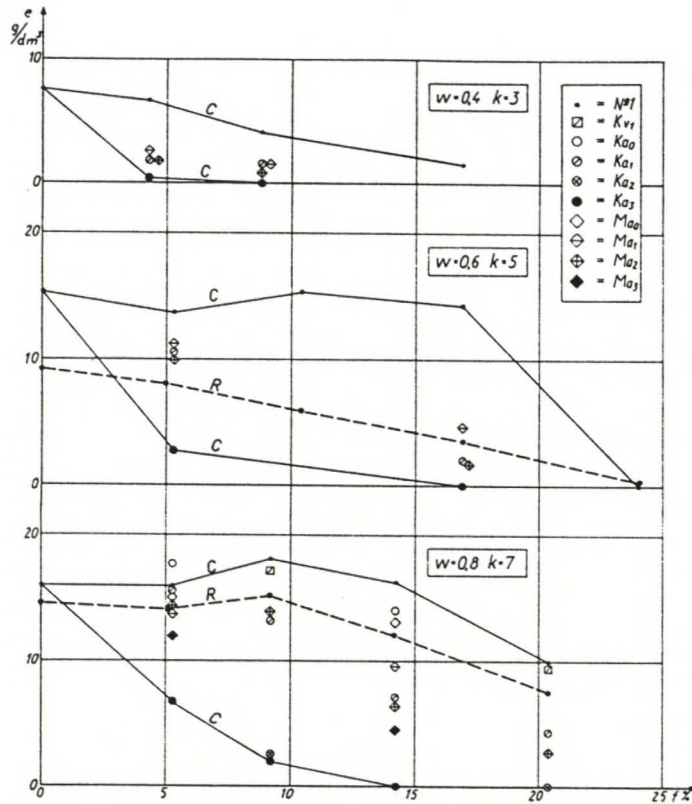
Vedenerottuminen

Tuoreen betonimassan pintaan kerääntyy usein vettä muutaman ensimmäisen tunnin aikana betonoinnin aloittamisesta. Tätä ilmiötä kutsutaan yleisesti vedenerottumiseksi. Betonimassan kiinteiden rakeiden ja hiukkasten laskeutuessa painovoiman vaikutuksesta tiiviimpään asemaan toisiinsa nähden, pakottaa tämä tiivistyminen veden virtaamaan kiinteiden osasten välitse ylöspäin. Veden ylöspäin virtaaminen synnyttää tiehyitä erityisesti betonin yläpinnan läheisyyteen sekä vesipesäkkeitä liikesuunnan edessä olevien kivien alle sitä enemmän, mitä enemmän vettä erottuu. Sekä tiehyet että vesipesäkkeet huonontavat betonin laatua. /Poijärvi, 1966/

Koossapysyvyyttä heikentää betonimassan notkeus. Sen sijaan koossapysyvyyttä parantavia tekijöitä ovat huokoistavat- ja vedentarvetta vähentävät lisäaineet, betonin hienojen ainesosien lisääntyminen ja sementin hienous. /RIL119/

Poijärven mukaan luonnon hienofillerin avulla ei vedenerottuminen vähentynyt käytettäessä vesisementtisuhteita 0.6 tai 0.8 ja niitä hienofillerimääriä, joilla massan notkeusominaisuudet paranivat, vaan päinvastoin kasvoivat kuvan 5 mukaisesti. Poijärven mukaan syynä lienee käytetyn fillerin varsin pieni ominaispinta-ala. Vedenerottumisen lievä lisääntyminen johtui todennäköisesti hienofillerin betonimassaa notkistavasta vaikutuksesta. Vesisementtisuhteen ollessa

0.4, jolloin hienofillerin käyttö ei enää notkistanut betonimassaa, vähensi myös karkeampien fillereiden käyttö veden-erottumista. /Poijärvi, 1966/



Kuva 5. Vedenerottumistuloksia fillerimäärän (f) funktiona eri vesisementtisuhteilla. /Poijärvi, 1966/

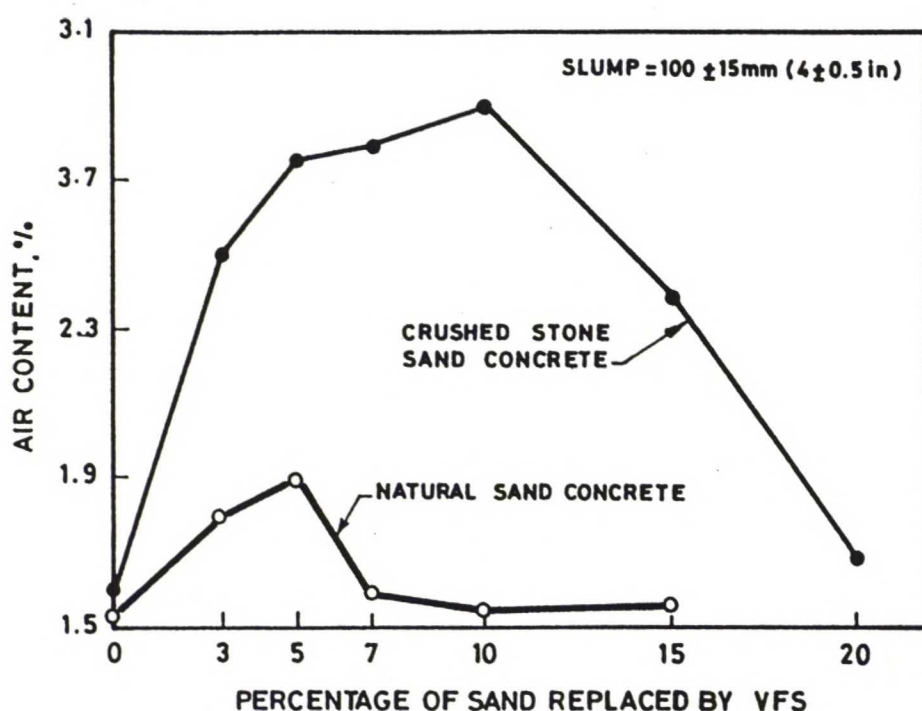
Myös Nicholsin /1982/, Ahmedin ja El-Kourdin /1989/ sekä Nevillen /1981/ mukaan vedenerottuminen vähenee hienon fillerin osuuden kasvaessa hienossa runkoaineessa.

Ilmapitoisuus

Betonimassaan jää aina sekoituksen ja tiivistämisen jälkeen ilmaa. Ilmapitoisuudella on merkittävä vaikutus sekä tuoreen että kovettuneen betonin ominaisuuksiin.

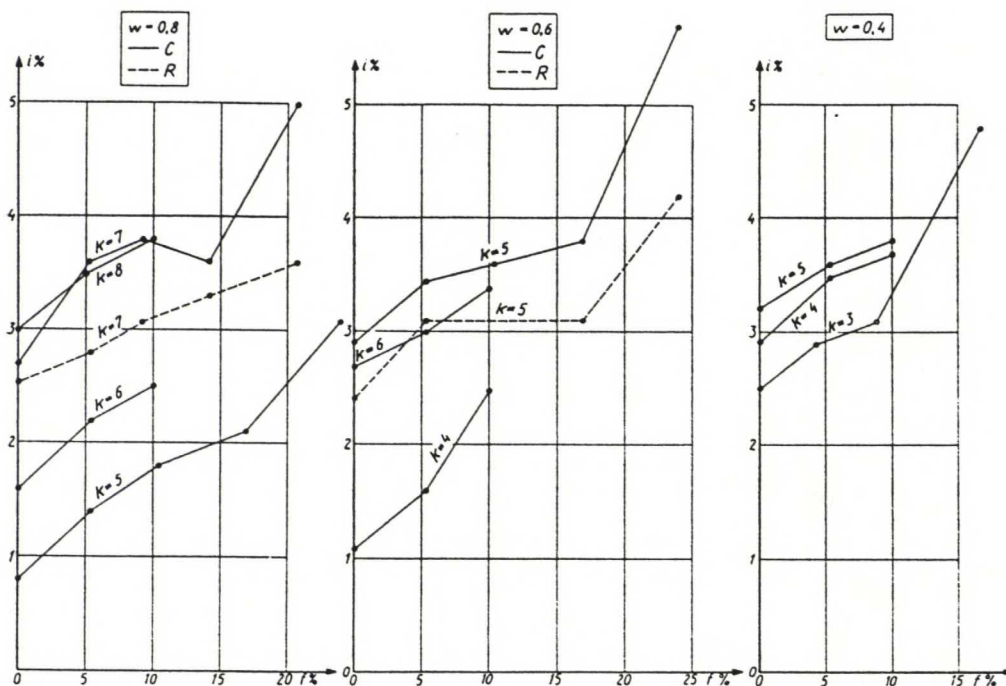
Ahmedin ja El-Kourdin /1989/ mukaan hiekan korvaaminen hienofillerillä kasvattaa ilmamäärää luonnon hienofillerillä 5 % asti ja murskefillerillä 10 % asti. Näiden määrien jälkeen

fillerimäärien lisäys pienentää massojen ilmamääriä. Murskefillerillä ilmamäärät kasvavat selvästi luonnonfilleriä enemmän. Tutkijoiden mukaan tämä todennäköisesti johtuu murskefillerin kulmikkaasta ja pitkänomaisesta muodosta. Kuva 6.



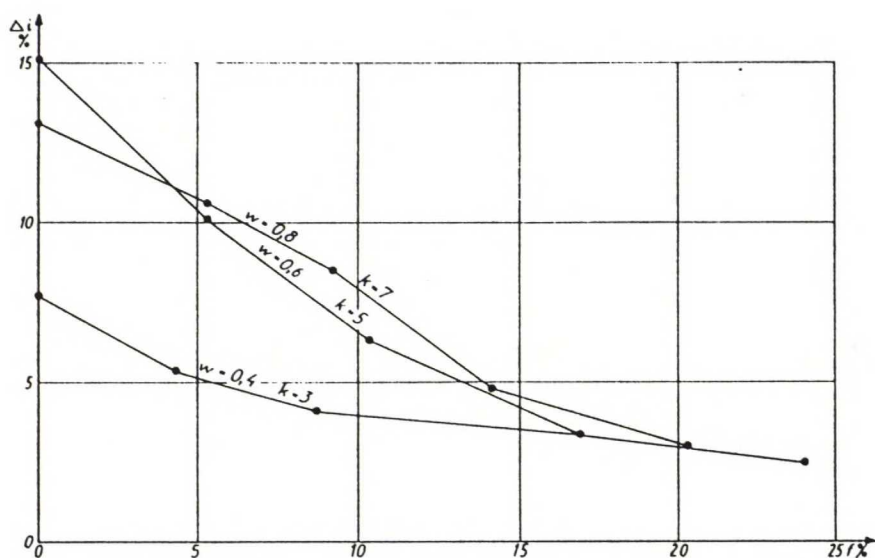
Kuva 6. Ilmapitoisuudet eri hienofillerimäärillä luonnon- ja murske kivibetonimassoilla, joiden painuma oli 100 mm. /Ahmed & El-Kour, 1989/

Poijärven mukaan hienofillerin määrän lisääminen 0 -> 15 % koko kiviaineksen määrästä kasvattaa ilmapitoisuutta 0.5-1.5 %. Kuvan 7 mukaan ilmapitoisuus kasvaa riippumatta vesisementtisuhteesta tai kiviainessementtisuhteesta. /Poijärvi, 1966/



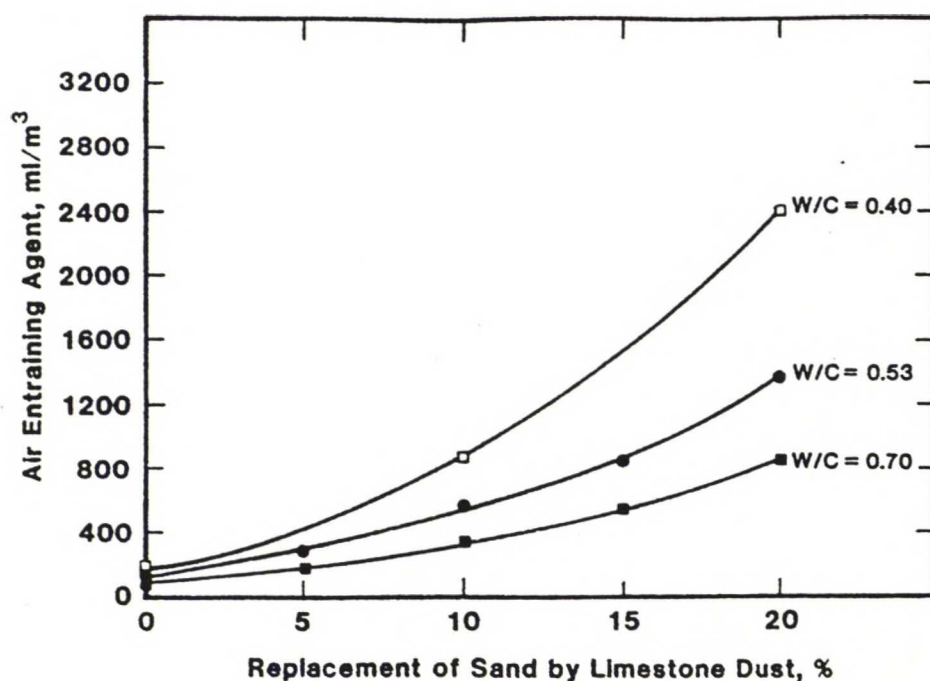
Kuva 7. Betonin ilmapitoisuus käytettäessä eri vesisementtisuhteita (w) ja kiviainesementtisuhteita (k) hienofillerimäärän (f) funktiona. /Poijärvi, 1966/

Huokostetussa betonissa huokostimen aiheuttama huokosmäärän lisäys notkeanplastisessa betonimassassa pienenee, kun massan hienofillerimäärä kasvaa. Kuvan 8 mukaan fillerimäärän kasvaessa alhaisella vesisementtisuhteella on ilmamäärän pieneneminen vähäisempää kuin korkeilla vesisementtisuhteilla. Lisäksi hienommilla fillereillä vähenee huokostimen teho enemmän kuin karkeammilla. /Poijärvi, 1966/



Kuva 8. Hienofillerimäärän (f) vaikutus huokostimen tehoon eri vesisementtisuhteilla (w). /Poiijärvi, 1966/

Samansuuntaisen tulokseen tulivat Malhotra ja Carette tutkimuksessaan, jossa he korvasivat osan hiekasta kalkkikivifillerillä. Heidän tutkimuksensa mukaan pienillä vesisementtisuhteilla kalkkikivifillerin osuuden lisääminen kasvattaa tarvittavaa huokostinmäärää enemmän kuin suuremmilla vesisementtisuhteilla. Kuva 9. /Malhotra & Carette, 1985/



Kuva 9. Kalkkikivifillerimäärän vaikutus huokostinannostukseen eri vesisementtisuhteilla. /Malhotra & Carette, 1985/

Saksalaisen tutkimuksen mukaan huokostinannostuksen tarve kasvaa hiekan hienouden lisääntyessä. Sen mukaan runsaasti alle 0.063 mm lajitetta sisältävät hiekat kasvattavat selvästi betonin huokostinannostusta. Hiekan sisältäessä savi-mineraaleja kasvaa huokostinannostus edelleen. /Springenschmidt & al, 1987/

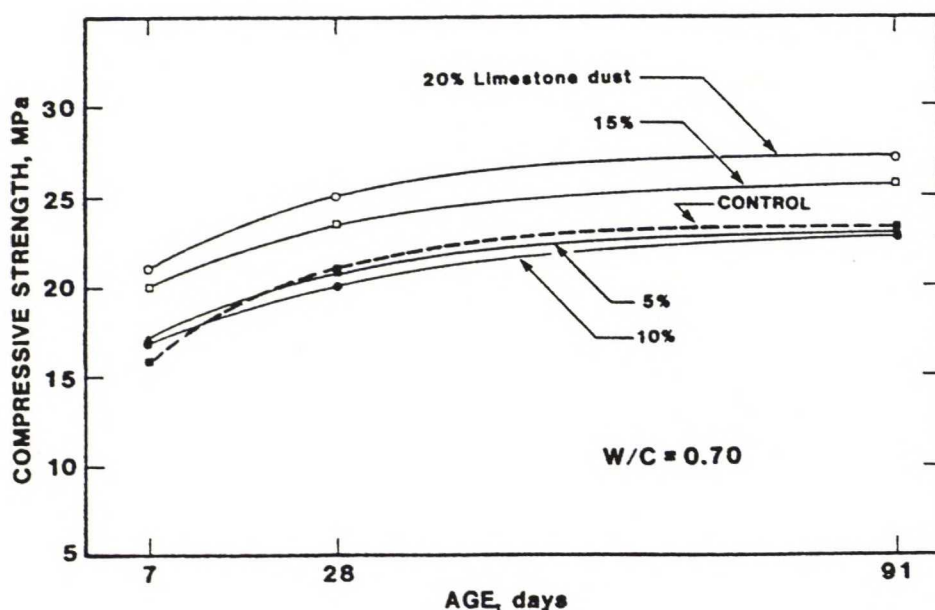
4.1.2 Kovettuneen massan ominaisuudet

Lujuus

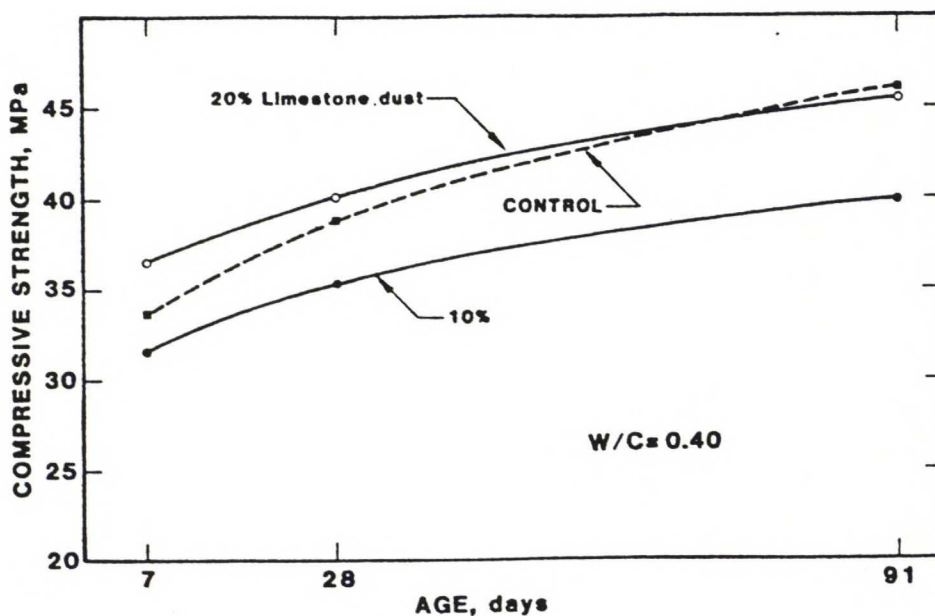
Hienoaineksen vaikutus betonin lujuuteen tapahtuu lähinnä lisääntyneen vedentarpeen kautta. Suurilla hienoainepitoisuuksilla vedentarve kasvaa ja mikäli vastaavasti sideainemäärää ei kasvateta, lujuudet pienenevät.

Poijärven mukaan hienofillerin käyttö parantaa betonin puristus- ja taivutusvetolujuuksia korkeilla vesisementtisuhteilla. Pienillä vesisementtisuhteilla hienofillerin käyttö ei paranna lujuuksia. Lujuus oli Poijärven kokeiden mukaan parhaimmillaan samoilla hienofillerimäärillä, joita käyttäen betonimassan muokkautuvuusominaisuudet olivat parhaimmillaan. /Poijärvi, 1966/

Kanadalaisen tutkimuksen mukaan on päästy samansuuntaisiin tuloksiin. Tutkimuksessa osa hiekasta korvattiin kalkkikivifillerillä. Korkealla vesisementtisuhteella 0.7 ja suurilla korvausmäärillä puristuslujuudet kasvoivat selvästi, mutta alemmilla vesisementtisuhteilla fillermäärän kasvaessa lujuus oli sama tai alempi kuin vertailubetoneilla. Varhaislujuudet 7 vrk:n ikäisinä olivat lähes kaikki parempia betoneissa, joissa osa hiekasta oli korvattu fillerillä. /Malhotra & Carette, 1985/

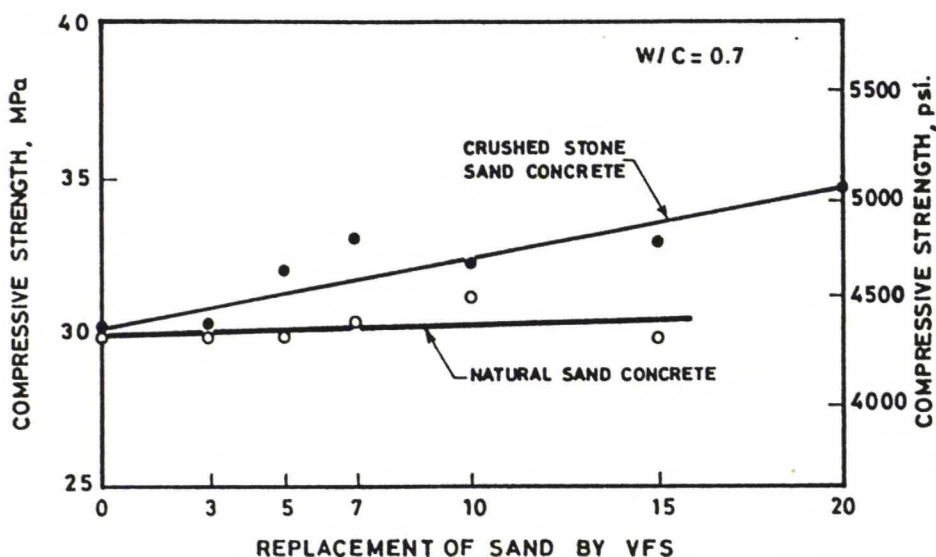


Kuva 10. Betonien lujuudenkehitys eri vesisementtisuhteella 0.70 ja eri kalkkikivifillerimäärillä. /Malhotra & Carette, 1985/



Kuva 11. Betonien lujuudenkehitys eri vesisementtisuhteella 0.40 ja eri kalkkikivifillerimäärillä. /Malhotra & Carette, 1985/

Banfillin ja Carrin /1987/ sekä Ahmedin ja El-Kourdin /1989/ mukaan hiekan korvaaminen luonnon hienofillerillä ei alenna betonin lujuutta, jos vesisementtisuhdetta ei nosteta. Korvattaessa osa hiekasta murskefillerillä lujuudet jopa hieman nousevat kuvan 12 mukaisesti.

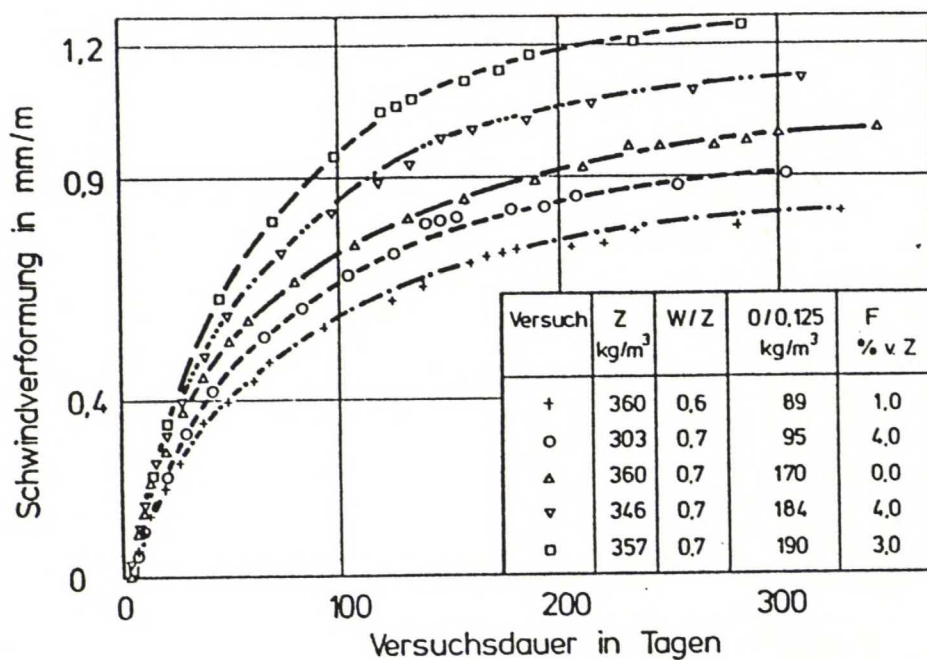


Kuva 12. 28 vrk:n puristuslujuudet erilaisilla hienofillerimäärillä vesisementtisuhteella 0.7. /Ahmed & El-Kour, 1989/

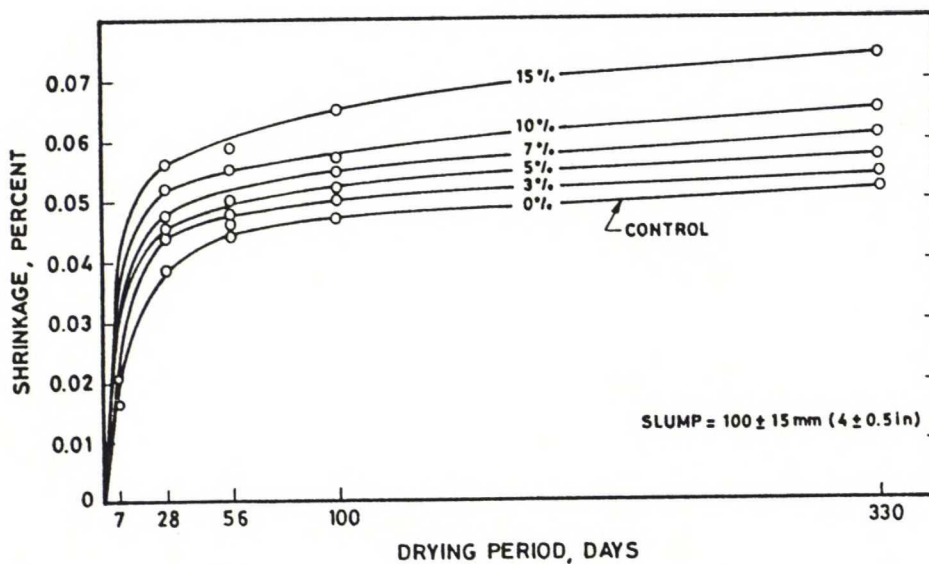
Kutistuma

Betonin vesimäärä vaikuttaa selvästi kuivumiskutistumaan. Kun käytetään runsaasti hienoaainesta sisältävää hiekkaa, kasvaa luvun 4.1.1 mukaan vedentarve yleensä ja siten myös kuivumiskutistuma kasvaa.

Saksalaisen tutkimuksen mukaan kovettuneen betonin kutistuma kasvaa kuvan 13 mukaisesti, kun hiekan alle 0.125 mm osuus kasvaa. /Ertingshausen & Brunswick, 1988/. Myös Ahmed ja El-Kour /1989/ ovat tulleet samankaltaiseen tulokseen tutkimuksissaan. Heidän mukaansa hiekan korvaus hienofillerillä kasvattaa kuivumiskutistumaa kuvan 14 mukaisesti. Kutistuma lisääntyy fillerimäärän kasvaessa. Kummassakin tutkimuksessa vesimäärät olivat nousseet hienoaineksen osuuden kasvaessa.



Kuva 13. Betonin kutistumamuodonmuutokset erilaisilla hienoainespitoisuuksilla. /Ertingshausen & Brunswick, 1988/



Kuva 14. Kuivumiskutistumamuodonmuutos iän funktiona luonnonfilleribetoneilla, joiden painuma oli 100 mm. /Ahmed & El-Kour, 1989/

Poijärven mukaan kutistumisen ja hienoaineksen määrän riippuvuus ei ole yksiselitteinen, vaan siihen vaikuttaa myös betonimassan notkeus sekä vesisementtisuhte. Korkeilla vesisementtisuhteilla ja notkeanplastisilla betonimassoilla hienofillerin lisäys kasvatti kutistumaa, mutta notkeanplastisella betonimassalla, jonka vesisementtisuhte oli 0.4, kutistuma pieneni. Samoin vetelällä massalla, jonka vesisementti suhde oli 0.8, pienehkö hienofillerin lisäys pienensi kutistumaa. Suuremmatkaan fillerimäärät eivät kasvattaneet kutistumaa. /Poijärvi, 1966/

Muut ominaisuudet

Poijärven /1966/ mukaan pienet hienofillerimäärät parantavat vedenpitävyyttä silloin kun työstettävyysominaisuudet paranevat. Suurilla hienofillerimäärillä vedenpitävyys huonontuu.

Malhotran ja Caretten /1985/ tutkimuksen mukaan kalkkikivifillerillä ei ollut vaikutusta betonin pakkasenkestävyyteen. Poijärven /1966/ mukaan korkeilla vesisementtisuhteilla hienofillerin osuuden kasvattaminen parantaa pakkasenkestävyyttä, mutta alhaisilla vesisementtisuhteilla fillerimäärillä ei ollut vaikutusta.

4.2 Karkean fillerin vaikutukset betonin ominaisuuksiin

Schäperin mukaan paljon 0.5 mm rakeita, mutta vähän alle 0.125 rakeita sisältävä hiekka kasvattaa betonin vedentarvetta. Lentotuhka soveltuu tutkijan mukaan hyvin tämäntyyppisestä hiekasta valmistetun betonin lisäaineeksi parantaen mm. työstettävyysominaisuuksia. /Shäper, 1987/

Murdockin mukaan suurin vaikutus betonin notkeuteen on 0.3-1.2 mm rakeilla, joilla laskettu pintaindeksi on 9. Hienoiman lajitteen 0-0.150 mm pintaindeksi on 2. Pintaindeksi on

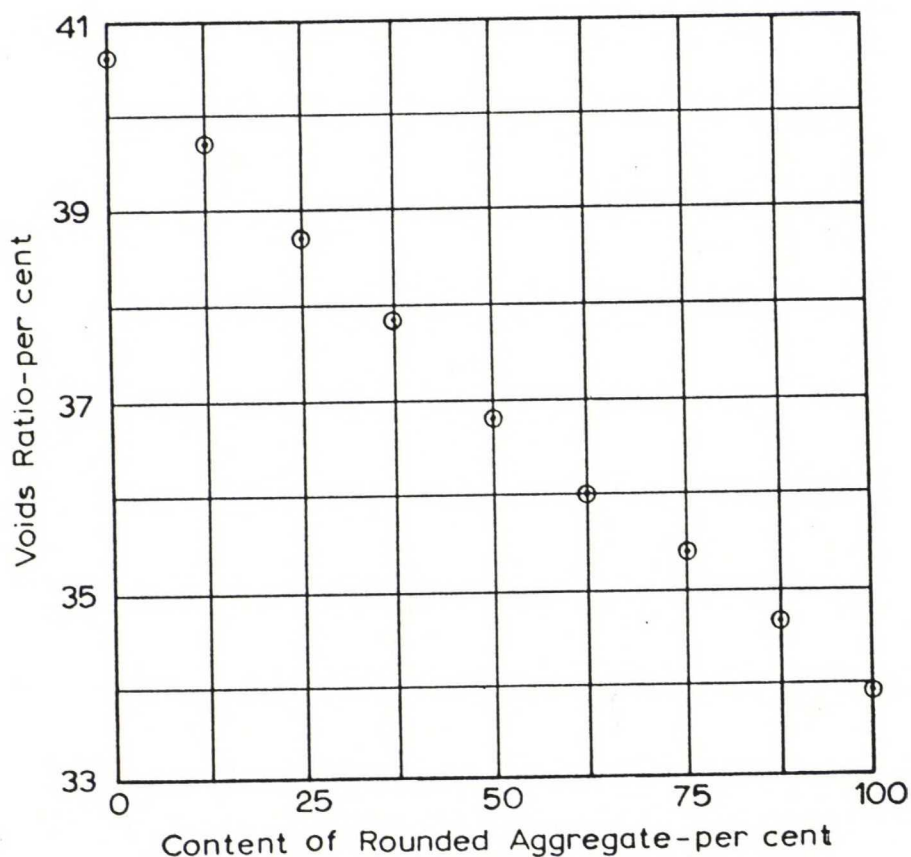
Murdockin tutkimuksissaan kullekin raekokoalueelle määrittelämä empiirinen vakio, joka kuvaa ko. raekokoalueen vaikutusta betonin työstettävyyteen. Yli 10 mm rakeiden pintaindeksi on negatiivinen, mikä kuvaa sitä, että maksimiraekoon suurentaminen parantaa massan työstettävyyttä. /Murdock, 1979/

ACI:n ohjeen /1984/ mukaan paljon 0.3-0.6 mm rakeita sisältävät hiekat vähentävät huokostinannostuksen määrää lisähuokostetussa betonissa.

5 HIEON RUNKOAINEEN MUODON VAIKUTUKSET BETONIN OMINAISUUKSIIN

Betonimassassa sementtiliimaa on oltava riittävästi kostutamaan runkoainerakeiden pinta sekä täyttämään niiden välinen tyhjätila. Tarvittava sementtiliimamäärä on näin riippuvainen rakeiden ominaispinta-alasta sekä runkoainerakeiden välisestä tyhjätilasta, joka määräytyy raemuodon, yhdistetyn rakeisuuden sekä tiivistystavan perusteella.

Runkoaineen ominaispinta-ala ja tyhjätila kasvavat runkoaineen kulmikkuuden kasvaessa, kuva 15.

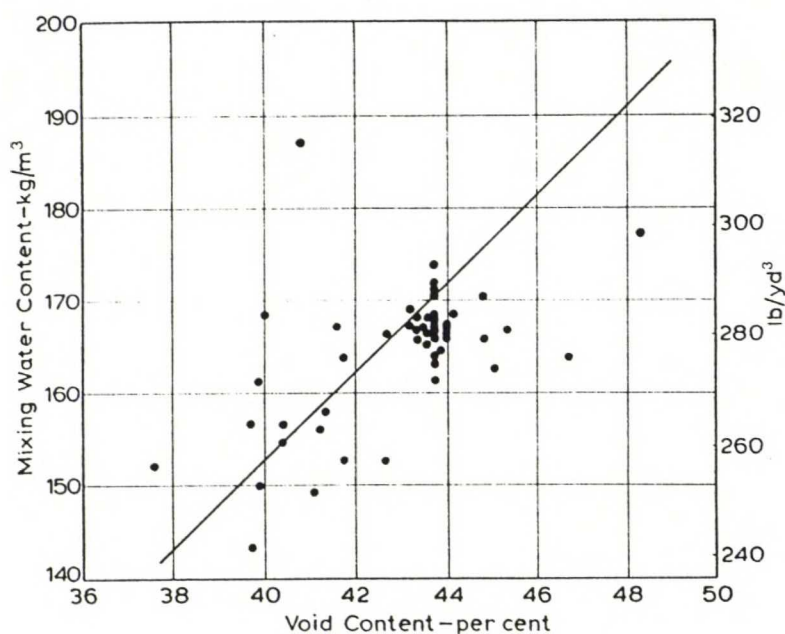


Kuva 15. Tyhjätilan riippuvuus runkoaineseoksen kulmikkuudesta. /Neville, 1981/

Toinen raemuodon vaikutusmekanismi on rakeiden kulmikkuuden ja pintojen rosoisuuden aiheuttama kitkan lisääntyminen betonia tiivistettäessä. Pyöreät ja sileäpintaist rakkeet taas liikkuvat helpommin toisiinsa nähden (ns. kuulalaakerivaiku-

tus). /Tattersall, 1976/

Fultonin /1977/ mukaan hiekan partikkeleiden muoto on eräs tärkeimmistä hiekan ominaisuuksista johtuen suurista vaikutuksista vedentarpeeseen. Myös Wills /1967/ on laajoissa tutkimuksissaan todennut, että hienon runkoaineen merkitys veden tarpeeseen on merkittävästi suurempi kuin karkean. Neljän prosentin tyhjätilan kasvu hienossa runkoaineseoksessa aiheutti 2-3 kertaa suuremman veden tarpeen lisäyksen kuin vastaava tyhjätilan kasvu karkeassa runkoaineseoksessa. Bloem ja Gaynor /1963/ havaitsivat, että hienon kiviaineksen kulmikkuudella on betonin vedentarpeeseen ainakin yhtä suuri vaikutus kuin karkean kiviaineksen kulmikkuudella.



Kuva 15. Betonin vedentarpeen riippuvuus hiekan tyhjätilasta. /Bloem & Gaynor, 1963/

6 TUTKIMUSOHJELMA

Kokeellisen tutkimuksen tavoitteena oli selvittää kirjallisuudesta saatujen viitteiden pohjalta hienon hiekan 0-2 mm käytön soveltuvuus valmisbetonin raaka-aineeksi. Lisäksi selvitettiin voidaanko betonin valmistuskustannuksia alentaa hienon hiekan käytöllä.

Tutkimukseen valittiin mukaan neljä luonnon muovaamaa 0-2 mm hiekkalajitetta sekä kivituhka 0-6 mm.

Aluksi selvitettiin kaikkien hiekkojen valmistusprosessit sekä tutkittiin laboratoriossa niiden tärkeimmät ominaisuudet.

Betonikokeissa tutkittiin eri lajitteiden vaikutukset betonimassojen työstettävyyteen sekä kovettuneiden betonien puristuslujuuksiin. Betonikokeissa betonityypit olivat rakennebetoni K30, lattiabetoni K30, huokostettu betoni K30 sekä rakennebetoni K50. Maksimiraekoko oli 16 mm lukuunottamatta lattiabetonia, jossa maksimiraekoko oli 8 mm. Kaikki massat tehtiin epäjatkuvarakeisella runkoaineella. Karkeana runkoaineena käytettiin 8-16 mm soraa, paitsi lattiamassassa, jossa käytettiin 4-8 mm soraa. Tavoitenotkeus oli lattiabeteineissa 1 sVB ja muissa 2 sVB.

K30 rakennebetonilla tehtiin kokeet kaikilla hiekkalajitteilla. Jatkokokeisiin valittiin kolme hiekkalajitetta sekä 0-4 mm hiekka vertailumassoihin.

Tuoreesta betonimassasta määritettiin painuma, ilmamäärä, tiheys ja lämpötila. Kovettuneesta betonista määritettiin 7 d ja 28 d puristuslujuus ja tiheys. Lisäksi huokostetulla tehtiin 28 d jälkeen 50 kierroksen pakkassuolakoe, jonka perusteella laskettiin pakkasenkestävyysluokka Tielaitoksen ohjeiden /1992/ mukaan.

Työmaakokeissa tutkittiin parhaiden betonien käyttökelpoi-

suus käytännön olosuhteissa. Tuoreesta betonimassasta määritettiin painuma, ilmamäärä, tiheys ja lämpötila. Työmaalla seurattiin betonimassojen pumppattavuutta ja työstettävyyttä sekä ilmamäärien muutosta kuljetuksen ja pumppauksen aikana. Kovettuneesta betonista määritettiin 7d ja 28 d puristuslujuus ja tiheys.

Laboratoriokokeet suoritettiin Lohja Oy Ab:n Konalan ja Virkkalan laboratorioissa. Työmaakokeiden betonit valmistettiin Lohja Oy Ab:n Kauklahden valmisbetoniasemalla.

7 HIEKKAKOKEET

7.1 Tutkittavat hiekat

Tutkittavaksi valittiin viisi rakeisuudeltaan ja tuotantotavaltaan eroavaa hiekkatyyppiä. Seuraavassa on esitetty lajitteiden valmistusperiaatteet.

Luonnon 0-2 mm

Kokeisiin valittiin tyypillinen Etelä-Suomesta saatava 0-2 mm hiekka. Lajitetta saadaan lähes suoraan useilta hiekanottopaikoilta. Suoraan rintauksesta otettaessa yleensä joudutaan seulomaan ainoastaan suurimmat rakeet pois. Yleisimmin käytetään siirrettävää Commander-seulaa, joka on esitetty kuvassa 17.



Kuva 17. Siirrettävä Commander-seula.

0-2 mm + 20 % filleri

Suuren hienoainesmäärän vaikutusten selvittämiseksi valmistettiin hiekkaerä, jossa luonnon 0-2 mm hiekkaan lisättiin 20 % filleriä 0-1 mm. Valmistus tapahtui Commander-seulalla.

Salaojasoran alite

Salaojasoran alitetta syntyy ylijäämätuotteena salaojasoran valmistuksessa. Pesuseulonnassa erotetaan yli 2 mm lajite salaojasoraksi ja 2 mm pienemmät rakeet ovat ylijäämätuote, jota nykyisin ei päästä hyödyntämään järkevästi. Kuvassa 18 on esitetty Lokomo-pesuseula Suomiehen hiekanottopaikalla.



Kuva 18. Lokomo-pesuseula.

Pesty 0-2 mm hiekka

Hiekan pesun vaikutusten selvittämiseksi valmistettiin erä pestyä hiekkaa. Pestyn hiekan raaka-aineena käytettiin luonnon 0-2 mm hiekkaa, joka pestiin edelläesitetyllä Lokomo-pesulinjalla.

Pesty kivituhka

Kivituhkalla tarkoitetaan hienorakeisen sepelin seulontavaiheessa syntyvää alarajan läpäisevää lajitetta. Kivituhka sisältää pääasiassa kalliomursketta. Kivituhka on rakeisuudeltaan selvästi muita karkeampaa rakeisuuden ollessa 0-6 mm.

7.2 Rakeisuus

Kaikista tutkimuksen hiekoista sekä betonikokeissa käytetyistä 4-8 mm että 8-16 mm sorasta määritettiin rakeisuudet normaaliseulasarjalla. Taulukossa 3 on esitetty kokeissa käytettyjen runkoaineiden rakeisuusjakaumat sekä rakeisuusluvut.

Taulukko 3. Kokeissa käytettyjen runkoaineiden rakeisuusjakaumat sekä rakeisuusluvut H.

Lajite	Läpäisyprosentti									H
	.125	.25	.5	1	2	4	8	16	32	
0-2 l	7.3	29	62	81	93	99	100	100	100	771
0-2 f	10.1	36	67	84	93	99	100	100	100	789
0-2 p	2.4	17	46	66	80	96	100	100	100	707
0-2 s	5.1	19	42	71	96	99	100	100	100	732
0-4 k	3.2	10	19	32	51	81	100	100	100	596
0-4 l	4.9	17	39	62	81	93	100	100	100	697
4-8 p	0.8	1	1	2	2	3	76	100	100	386
8-16	1.2	1	2	2	2	2	5	83	100	298

l on luonnon hiekka

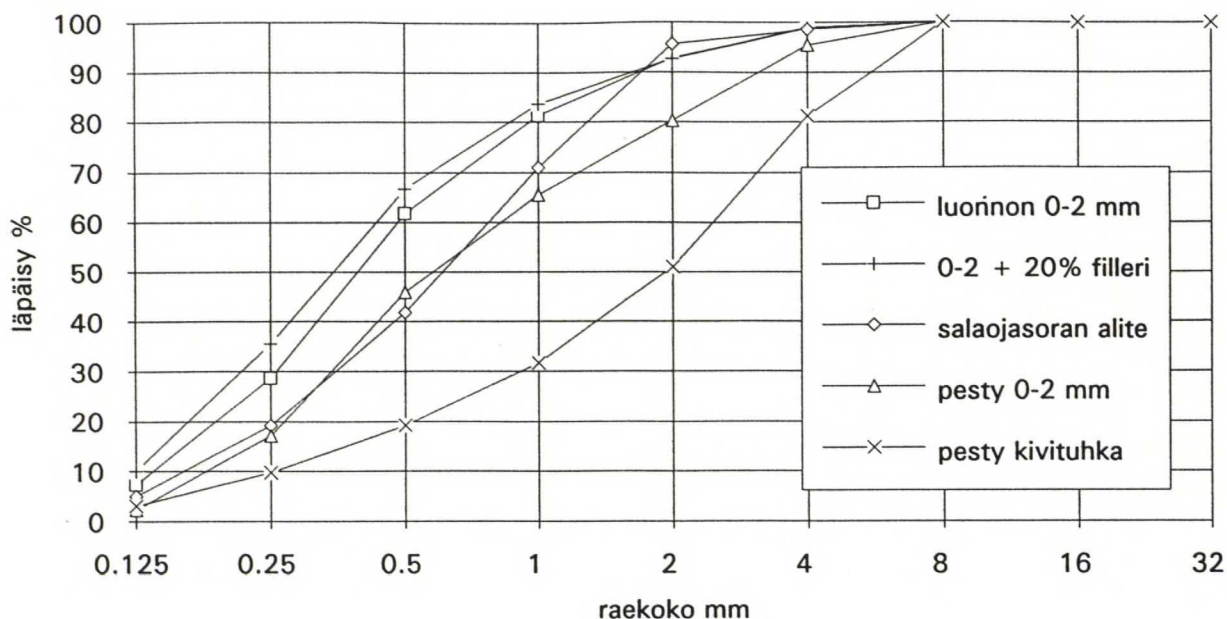
f on 20 % fillerilisäys luonnon hiekkaan

p on pesty

s on salaojasoran alite

k on pesty kivituhka

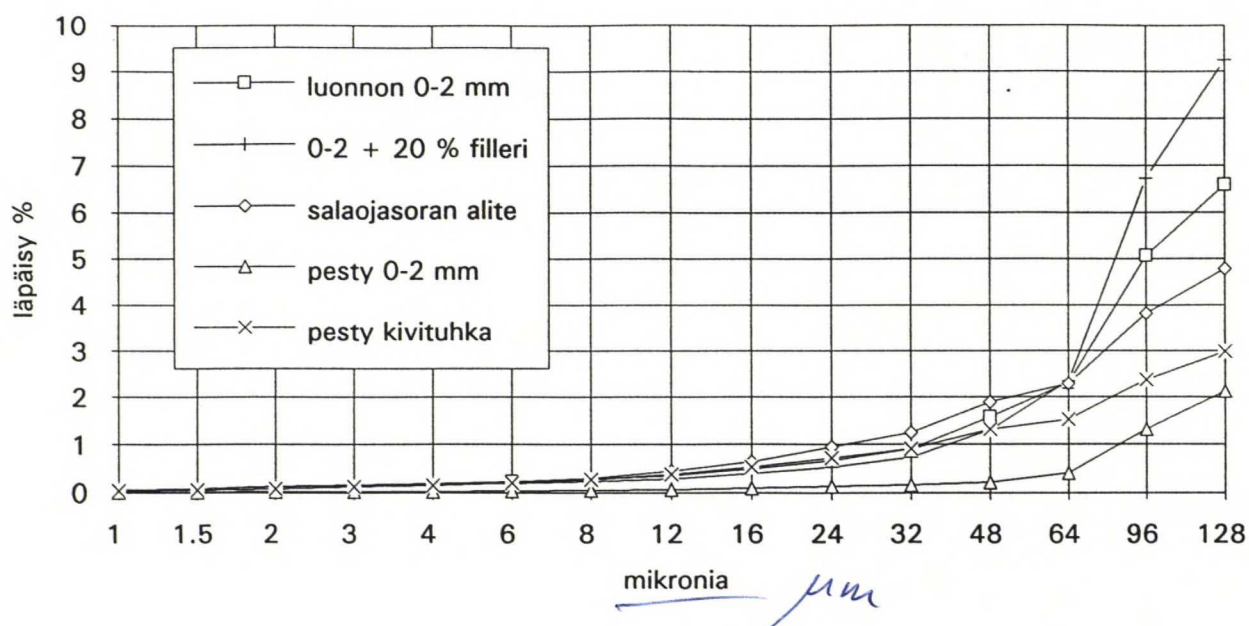
Kuvassa 19 on esitetty tutkimuksen hiekkojen normaaliseulasarjalla määritetyt rakeisuuskäyrät.



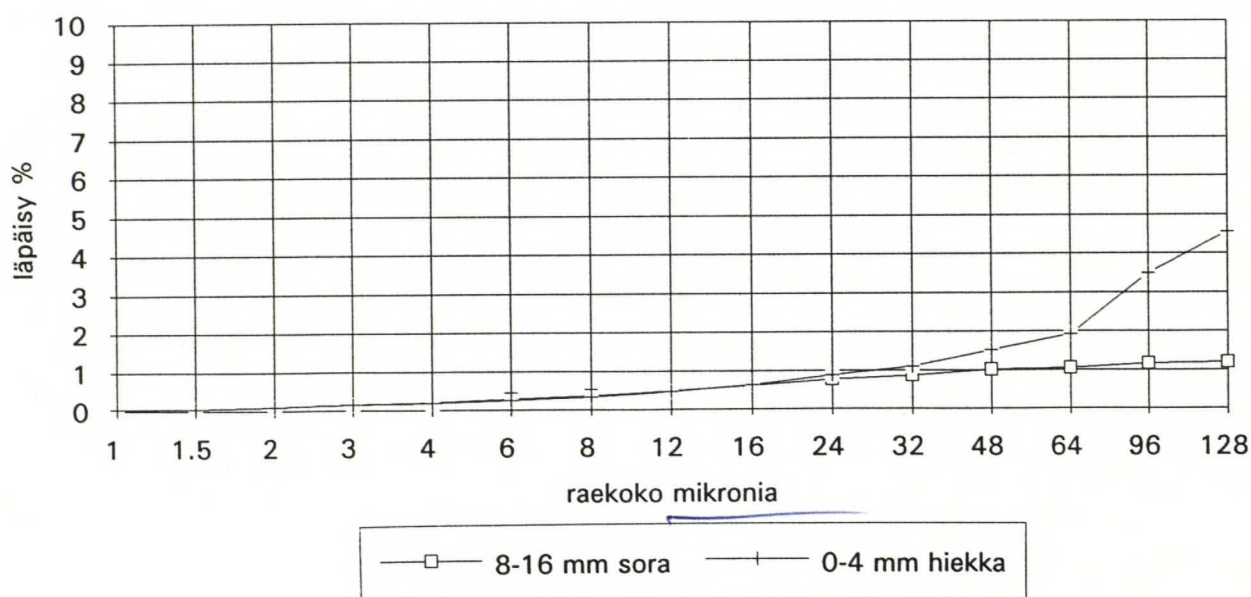
Kuva 19. Tutkimuksen hiekkojen rakeisuuskäyrät.

Fillerin lisäys luonnon 0-2 mm hiekkaan on lisännyt rakeisuutta tasaisesti 1.0 mm asti. Pesun vaikutus hiekan rakeisuuteen on suuri. Pestyissä lajitteissa, salaojasoran alitteissa sekä pestyssä 0-2 mm hiekassa, on selvästi muita hiekkoja vähemmän alle 1.0 mm rakeita. Pesty kivituhka on selvästi muita lajitteita karkeampaa maksimiraekoon ollessa 6.0 mm.

Eri lajitteiden alle 0.125 mm osan rakeisuusjakaumat tutkittiin laserdiffraktioon perustuvalla CILAS-granulometrillä, jonka mittausalue on 1-192 mikronia. Kuvissa 20 ja 21 on esitetty tutkimuksen runkoaineiden 0.125 mm alitteen rakeisuuskäyrät.



Kuva 20. Tutkimuksen hienojen hiekkojen 0.125 mm alitteen rakeisuuskäyrät.



Kuva 21. Vertailuhiekan 0-4 mm sekä 8-16 mm soran 0.125 mm alitteen rakeisuuskäyrät.

Eräistä lajitteista tutkittiin myös 0.125 mm alitteen ominaispinta-alat typpiadsorptiomenetelmällä. Taulukossa 3 on esitetty lajitteiden ominaispinta-alat.

Taulukko 4. Eräiden lajitteiden 0.125 mm alitteen ominaispinta-alat.

hiekkä	0-4 v	0-2 l	0-2 p	0-2 s
ominais- pinta-ala (m ² /kg)	1960	1420	840	2440

v on vertailuhiekka 0-4 mm

l on luonnon 0-2 mm hiekka

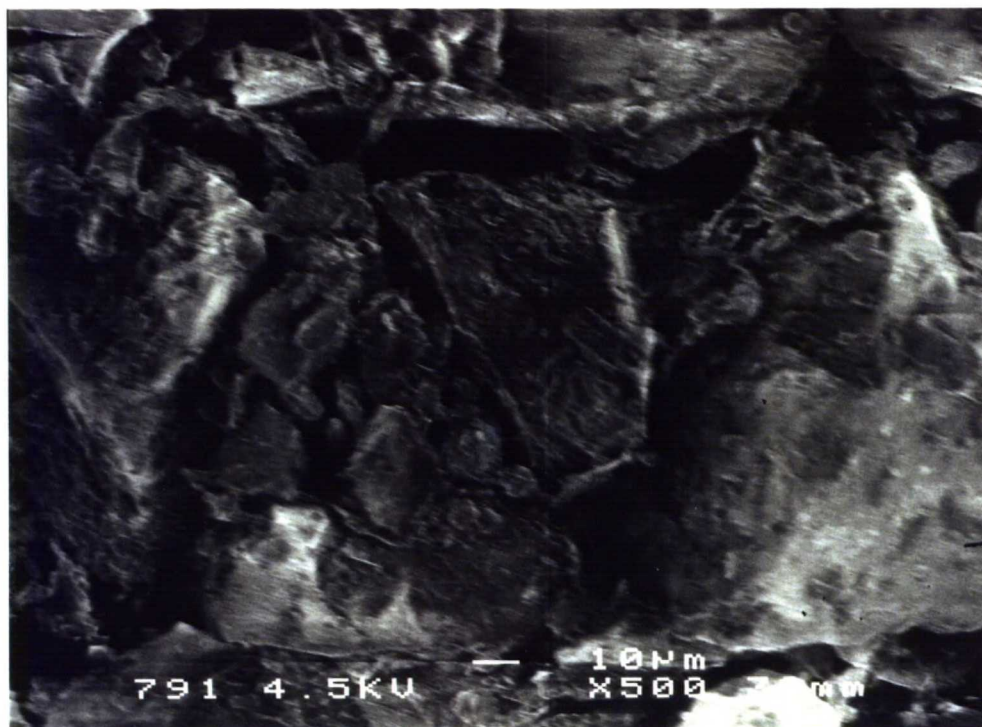
p on pesty hiekka

s on salaojasoran alite

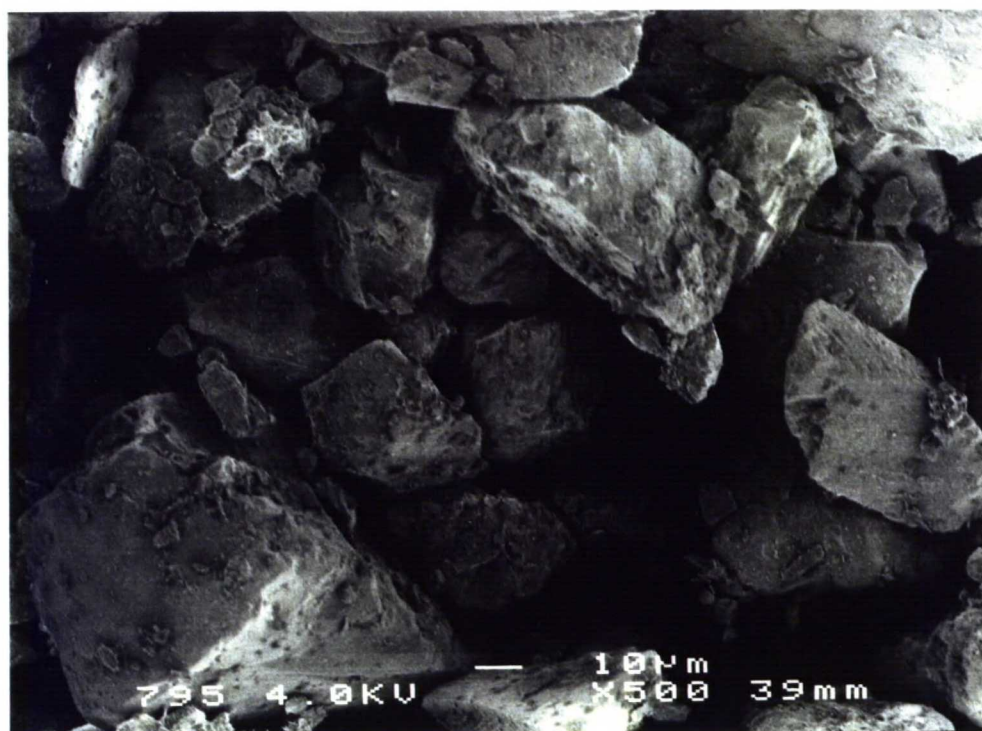
Hiekan pesun vaikutus alle 0.125 mm rakeisuuteen on erittäin suuri. Pestyssä hiekassa on selvästi muita vähemmän hienoaainesta. Tämä voidaan havaita sekä rakeisuusjakaumasta että ominaispinta-alasta. Salaojasoran alitteen hienon pään rakeisuus on muita koehiekkoja hienompaa. Alle 0.064 mm rakeiden osuus on suurempi kuin muilla hiekoilla, mikä näkyy myös ominaispinta-aloissa, koska juuri erittäin hienot rakeet lisäävät voimakkaasti ominaispinta-alaa. Pesemättömän 8-16 mm soran kivien pintaan tarttunut 0.125 mm alite on erittäin hienojakoista. Sen vaikutus betonin yhdistetyn runkoaineen hienopään rakeisuuteen on suuri ja näin ollen se vaikuttaa myös selvästi betonin vedentarpeeseen.

7.3 Raemuoto

Tutkittavista hiekoista selvitettiin 0.125 mm alitteen raemuoto elektronimikroskooppilla. Mikroskooppikuvissa on käytetty 500 kertaista suurennosta. Kuvissa 22-25 on esitetty jatkokokeisiin valittujen lajitteiden mikroskooppikuvat.



Kuva 22. 0-4 mm hiekan 0.125 mm alitteen elektronimikroskooppikuva. Suurennos 500 kertainen.



Kuva 23. Luonnon 0-2 mm hiekan 0.125 mm alitteen elektronimikroskooppikuva. Suurennos 500 kertainen.



Kuva 24. Salaojasoran alitteen 0.125 mm alitteen elektronimikroskooppikuva. Suurennos 500 kertainen.



Kuva 25. Pestyn hiekan 0.125 mm alitteen elektronimikroskooppikuva. Suurennos 500 kertainen.

Kuvista havaitaan, että salaojasoran alitteella on selvästi muita enemmän liuskeisia ja levymäisiä rakeita, jotka kasvattavat betonin vedentarvetta. Pestyllä hiekalla 0.125 mm alite on puhdasta ja levymäisiä rakeita on vähän. Luonnon 0-2 mm hiekalla pienet rakeet ovat suurelta osin joko pyöreähköjä tai kuutiomaisia, jotka ovat betonin työstettävyyden kannalta edullisia.

7.4 Puhtaus

Kaikille tutkituille hiekoille tehtiin liete- ja humuskokeet. Kaikki hiekat täyttävät betonihiekalle asetetut laatuvaatimukset. Betonin kiviainesohjeiden mukaan betoniin käytettävän kiviaineksen humusaste saa olla enintään I, kun se kaikilla hiekoilla oli 0. Lietepitoisuus vaihteli 2.0 ja 3.8 % välillä. Pesussa lietepitoisuus pieneni 1.7 %. Kokeiden tulokset on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Koehiekkojen humus- ja lietekokeiden tulokset.

	humus	liete %
0-4 vertailu	0	2.4
0-2 + filleri	0	3.8
0-2 luonnon	0	3.7
0-2 salaojasora	0	3.5
0-2 pesty	0	2.0
pesty kivituhka	0	2.5

8 BETONIKOKEET

8.1 Materiaalitiedot

Sideaineet

Sideaineena käytettiin Lohja Oy Ab:n P 40/7 sementtiä. Lisäksi kaikissa betoneissa, huokostettuja betoneita lukuunottamatta, käytettiin lentotuhkaa, jonka hiilipitoisuus oli 4.2 %. Sementin puristuslujuudet olivat 1, 3 ja 7 vuorokauden ikäisinä 27, 41 ja 45 MN/m². Sideaineiden analyysitulokset on esitetty liitteessä 1.

Runkoaineet

Betonikokeissa käytettyjen runkoaineiden fysikaaliset ominaisuudet on esitetty luvuissa 7.2-7.4.

Vesi ja lisäaineet

Kokeissa käytetty vesi oli Helsingin kaupungin vesijohtovettä. Huokostetuissa betonimassoissa käytettiin vinsolhartsipohjaista huokostinta Mischoel VR/T.

8.2 Betonimassan valmistus ja massakokeet

Betonin osa-aineet punnittiin suhteutusten mukaisesti ja kaadettiin 60 dm³ pakkosekoittimeen siten, että karkea runkoaine tuli ensimmäiseksi, tämän jälkeen lisättiin hiekka ja sideaineet sekä vesi. Huokostetuissa betoneissa huokostin lisättiin noin 15 sekunnin sekoituksen jälkeen. Sekoitusaika oli 3 minuuttia.

Tuoreista massoista määritettiin betonikartion painuma, tiheys ja ilmamäärä Betonistandardeja 1988 noudattaen. Painuma

mitattiin 30 minuutin välein kahden tunnin ajan tai kunnes painuma oli alle 5.0 cm. Painuma mitattiin koko ajan samasta näytteestä, joten sitä ei voida pitää häiriintymättömänä. Lisäksi massojen työstettävyyttä arvioitiin silmämääräisesti.

8.3 Koekappaleiden valmistus, säilytys ja testaus

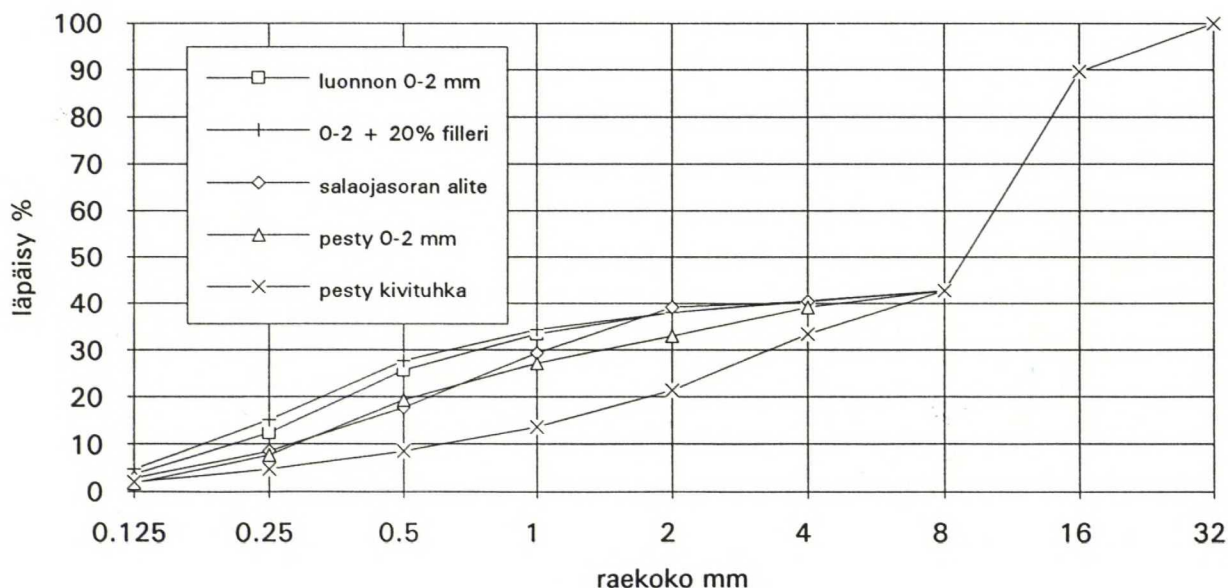
Puristuslujuuskokeita varten valmistettiin jokaisesta valuerästä $150 * 150 * 150 \text{ mm}^3$ kuutioita 10 minuutin kuluessa sekoituksesta. Valun jälkeen koekappaleet peitettiin muovikalvolla kosteuden haihtumisen estämiseksi. Koekappaleet purettiin muoteista 1 vrk:n ikäisinä, jonka jälkeen niitä säilytettiin kosteushuoneessa ($T=20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ja RH 95 %). Koekappaleet siirrettiin kosteushuoneesta 1 vrk ennen lujuuden määrittystä.

Puristuslujuudet määritettiin 7 ja 28 vrk:n ikäisinä. Molempaa testausikää varten valmistettiin kolme koekuutiota.

9 RAKENNEBETONI K30

Ensimmäisen koesarjan lujuusluokka oli K30 ja maksimiraekoko 16 mm. Tavoitepainuma oli 100 ± 10 mm. Kaikilla hiekoilla tehtiin kolme massaa, joissa käytettiin erilaisia hiekkamääriä. Näin pyrittiin selvittämään paras runkoaineyhdistelmä kullekin hiekalle. Ensimmäisessä koesarjassa käytettiin 35, 40 ja 45 % hiekkamääriä. Kuvassa 26 on esitetty koesarjan betonien yhdistetyt runkoainejakaumat 40 % hiekkamäärällä.

Vesisideainesuhde pidettiin vakiona 0.78 ± 0.01 . Jokaiselle massalle etsittiin oikea suhteitus siten, että tavoitepainuma saavutettiin oikealla vesisideainesuhteella. Sementtimäärät vaihtelivat 207 ja 243 kg/m³ välillä.



Kuva 26. Yhdistetyn runkoaineen rakeisuusjaukaumat koehiekoilla, kun hiekkamäärä on 40 %.

9.1 Betonimassan ominaisuudet

Taulukko 6. Betonimassojen vedentarve sekä ominaisuudet rakennebetonilla K30 16 mm 2 sVB.

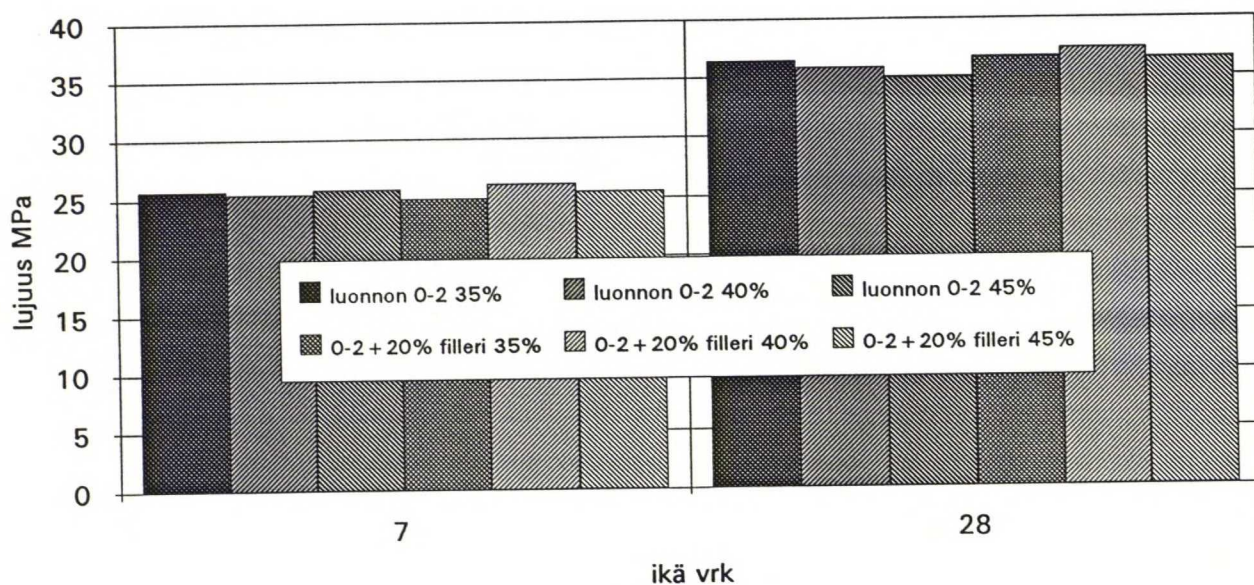
Hiekkatyyppi, hiekkamäärä runkoaineesta	Vesi (kg/m ³)	Painuma (cm)	Ilmamäärä (%)	Tiheys (kg/m ³)	L.tila (°C)
luonnon 0-2					
35 %	204	11.0	0.5	2380	18.5
40 %	206	11.5	0.6	2380	17.5
45 %	208	11.0	0.9	2368	17.2
0-2 + filleri					
35 %	207	11.0	0.6	2385	16.8
40 %	209	9.5	0.9	2378	18.8
45 %	208	9.0	0.8	2368	17.8
salaojasoran alite					
35 %	215	11.5	0.6	2373	19.8
40 %	218	11.5	0.7	2355	16.5
45 %	220	10.0	1.0	2348	17.9
pesty 0-2					
35 %	188	10.0	0.4	2408	18.0
40 %	187	11.5	0.7	2403	17.9
45 %	187	10.0	0.9	2393	17.0

Pestyä kivituhkaa käytettäessä betonimassojen työstettävyyss oli huono. Muista hiekoista poikkeavasta rakeisuudesta johtuen jouduttiin massoissa hiekkamäärää nostamaan jopa 70 %, jotta massoista saatiin työstettävyydeltään tyydyttäviä. Tällöinkin massojen koossapysyvyys oli huono ja vedentarve oli selvästi muita suurempi. Vedentarpeen kasvu johtuu huonosta raemuodosta. Murskauksessa syntyvät rakeet ovat särmikkaita ja puikkomaisia. Heikosta työstettävyydestä ja suuresta vedentarpeesta johtuen valuissa ei tehty tarkempia

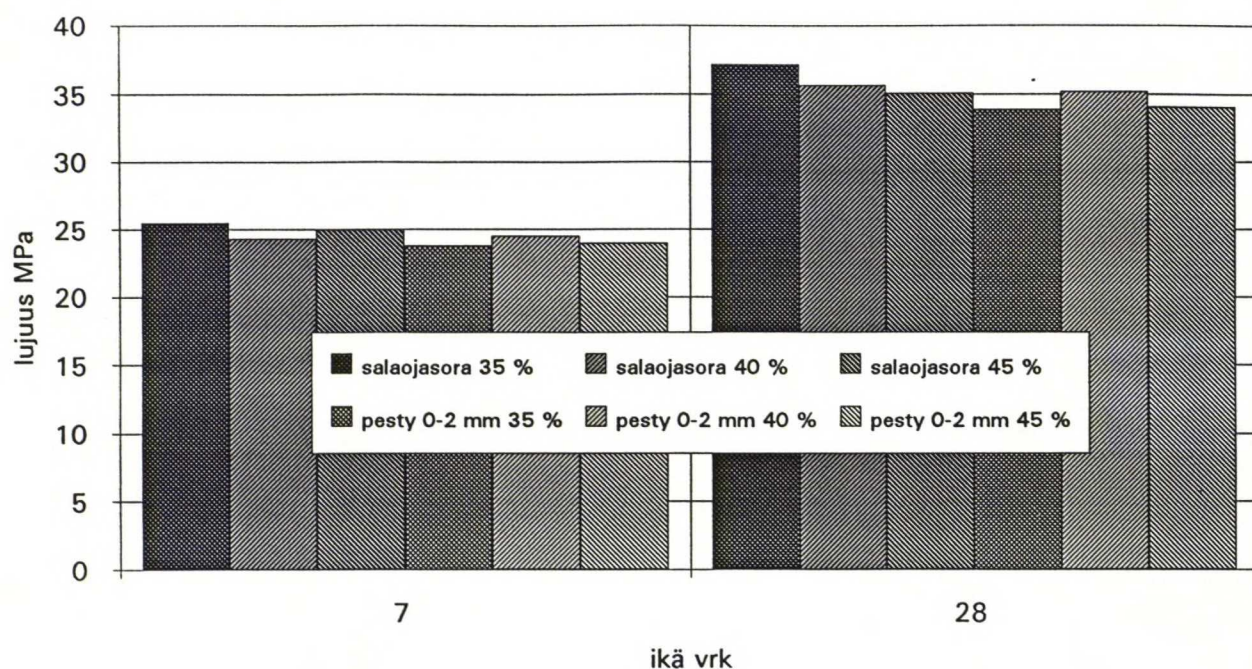
kokeita eikä puristuslujuuskoekappaleita.

9.2 Kovettuneen betonin ominaisuudet

Kuvissa 27 ja 28 on esitetty rakennebetonien K30 puristuslujuuskokeiden tulokset 7 ja 28 vrk:n ikäisinä. Lujuustulokset on laskettu kolmen puristuskappaleen tuloksen keskiarvona. Täydelliset koetulokset on esitetty liitteessä 2.



Kuva 27. Rakennebetonin K30 16 mm 2 sVB puristuslujuudet 7 ja 28 vrk:n ikäisinä.



Kuva 28. Rakennebetonin K30 16 2 sVB puristuslujuudet 7 ja 28 vrk:n ikäisinä.

9.3 Koetulosten tarkastelu

Betonimassalla tehdyt kokeet

Koemassojen lämpötilat vaihtelivat 16.8 ja 19.8 °C välillä, joten lämpötilaerot eivät todennäköisesti vaikuttaneet koetuloksiin. Ilmapitoisuudet olivat 0.5-1.0 %. Kaikilla hiekoilla ilmapitoisuudet kasvoivat hieman hiekan osuutta lisättäessä.

Luonnon 0-2 mm hiekkaa sekä hiekkaa, johon lisättiin 20 % filleriä, käytettäessä massat olivat työstettävyydeltään hyviä. Ainoastaan massat, joissa hiekkamäärät olivat 35 % tuntuivat selvästi kivisiltä, muilla hiekkamäärillä kivisyyttä ei ollut. Massat eivät olleet sitkeitä edes 45 % hiekkamää-

rillä. Vedentarpeeseen fillerin lisäys aiheutti noin 1.5 % kasvun.

Hienoaineksen pieni määrä tuntui selvästi pestyllä hiekalla tehdyissä massoissa. 45 % hiekkamäärällä massa oli työstettävyydeltään hyvää, mutta alemmilla hiekkamäärillä massat olivat karkeita ja kivisiä. Vedentarvetta tarkasteltaessa hienoaineksen pieni määrä näkyy erittäin selvästi; vedentarve pieneni pesun seurauksena noin 10 % luonnon 0-2 mm hiekkaan verrattuna. Muista hiekoista poiketen pestyä hiekkaa käytettäessä vedentarve ei kasvanut hiekkamäärää lisätessä.

Salaojasoran alitetta käytettäessä 35 % hiekkamäärällä massa oli kivinen. Suuremmilla hiekkamäärillä massat olivat työstettävyydeltään koko koesarjan parhaita. Eräs merkittävä syy tähän lienee muita hiekkoja selvästi suuremmat vesi- ja siideainemäärät. Luonnon 0-2 mm hiekkaan verrattuna vesimäärät kasvoivat 5-6 %. Vedentarpeen kasvu johtunee salaojasoran alitteen muita suuremmasta ominaispinta-alasta sekä raemuodosta.

Työstettävyyden heikentyminen oli kaikilla hiekoilla samantilaista. Painuman pienentyminen oli kaikissa massoissa riipuvainen hiekkamäärästä ja vedentarpeesta.

Kaikilla kokeissa käytetyillä hiekoilla, lukuunottamatta pestyä kivituhkaa, voidaan valmistaa työstettävyydeltään hyvää massaa lujuusluokassa K30. Hiekkamäärät vaikuttavat olennaisesti massan työstettävyyssominaisuuksiin. Pestyä kivituhkaa ei voida käyttää betonin ainoana hienona runkoaineena.

Kovettuneen betonin kokeet

Koska vesisideainesuhde kokeissa oli vakio, ei puristuslujuuksissa esiintynyt suurta hajontaa eri koebetonien välil-

lä. 7 vuorokauden puristuslujuudet vaihtelivat 23.8 ja 26.2 MN/m² välillä ja 28 vuorokauden puristuslujuudet 33.9 ja 37.4 MN/m² välillä. Suurimmat puristuslujuudet olivat betoneissa, joissa käytettiin 0-2 mm hiekkaa, johon oli lisätty 20 % filleriä. Pienimmät lujuudet olivat betoneissa, joissa käytettiin pestyä 0-2 mm hiekkaa, jolloin myös sideainemäärät olivat selvästi muita koebetoneita pienemmät. Hiekkamäärän ja puristuslujuuden välillä ei ole havaittavissa korrelaatiota.

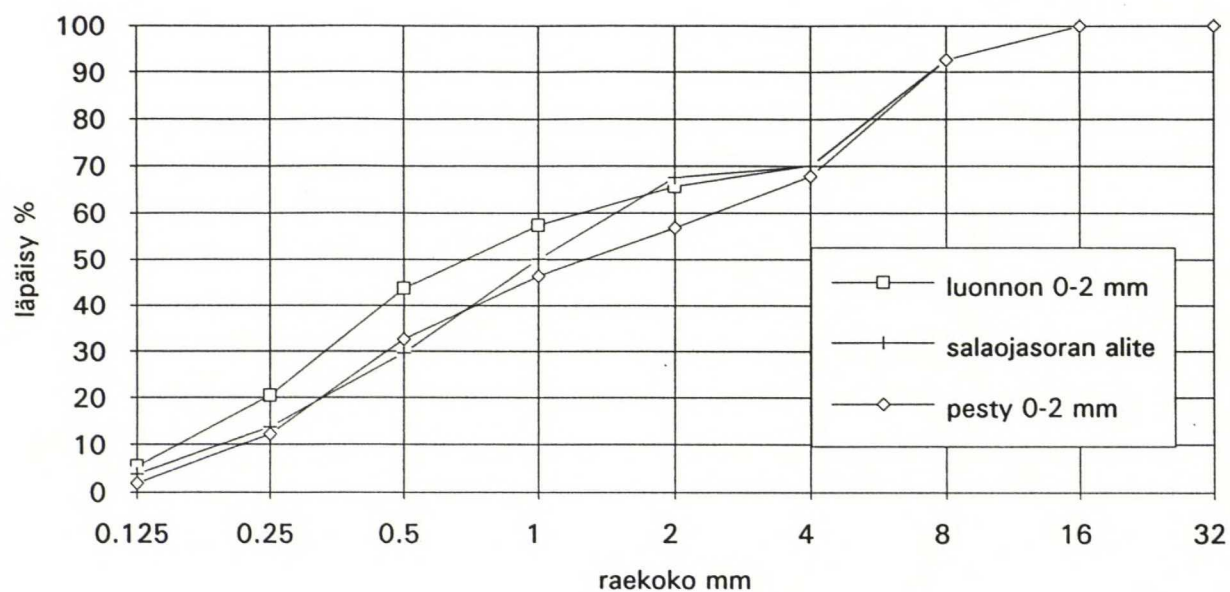
10 JATKOKOKEET ERI MASSATYYPEILLÄ

Ensimmäisen koesarjan perusteella valittiin jatkokokeisiin kolme hiekkalajitetta: luonnon 0-2 mm, pesty 0-2 mm sekä sa-laojansoran alite. Jatkokeissa tehtiin kaikissa koesarjoissa myös vertailubetoni, jossa käytettiin 0-4 mm hiekkaa.

Betonityypit jatkokokeissa olivat K30 8 mm lattiabetoni, K30 huokostettu 16 mm betoni sekä K50 16 mm betoni. Kaikilla hiekoilla tehtiin jokaisella betonityypillä kolme massaa sitten, että hiekkamäärää vaihdeltiin työstettävyydeltään sekä hinaltaan parhaan runkoaineyhdistelmän löytämiseksi. Lisäksi jokaiselle betonityypille tehtiin vertailubetonit, joissa käytettiin betonitehtailla käytössäolevaa 0-4 mm hiekkaa.

10.1 Lattiabetoni K30

K30 lattiabetoneilla maksimiraekoko oli 8 mm ja tavoitepainuma 15.0 cm. Vesisideainesuhde pidettiin kokeissa vakiona. Kokeissa sementtimäärät olivat 299-338 kg/m³ ja lentotuhkamäärät 69-78 kg/m³. Vertailubetonissa hiekkamäärä oli 73 %, muilla koehiekoilla tehdyissä betoneissa käytettiin 65, 70 ja 75 % hiekkamäärää. Karkeana runkoaineena käytettiin 4-8 mm soraa. Kuvassa 29 on esitetty yhdistetyn runkoaineen rakeisuusjakaumat eri hiekoilla 70 % hiekkamäärillä sekä vertailuhiekalla.



Kuva 29. Yhdistetyn runkoaineen rakeisuusjakaumat, kun hiekkamäärä on 70 %.

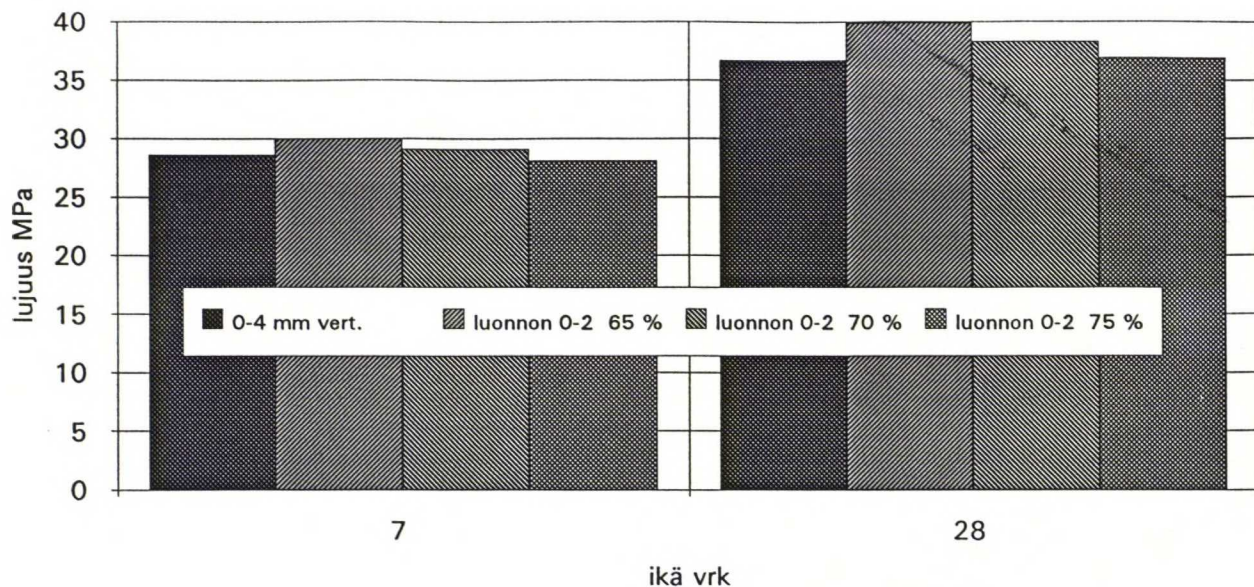
10.1.1 Betonimassan ominaisuudet

Taulukko 7. Betonimassojen vedentarve sekä ominaisuudet lattiabetonilla K30 8 mm 1 sVB.

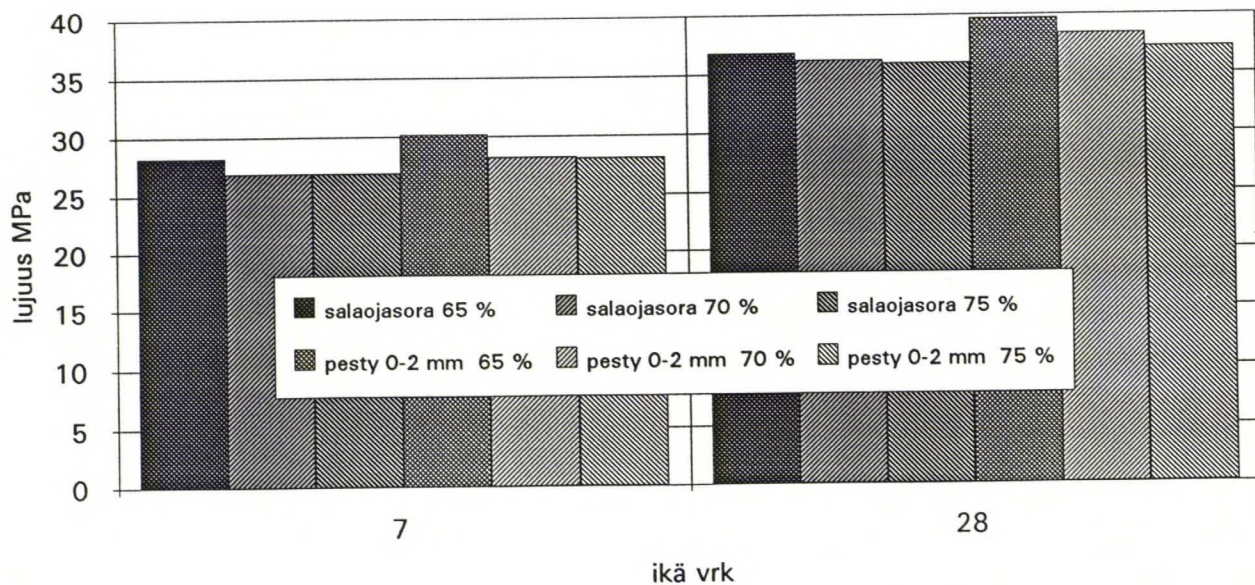
Hiekkatyyppi, hiekkamäärä runkoaineesta	Vesi (kg/m ³)	Painuma (cm)	Ilmamäärä (%)	Tiheys (kg/m ³)	L.tila (°C)
0-4 mm vert.	235	15.0	1.2	2310	22.5
luonnon 0-2 65 %	238	15.0	1.1	2303	20.0
70 %	239	14.0	1.5	2300	21.5
75 %	240	14.0	1.4	2295	20.0
salaojasoran alite 65 %	255	15.0	1.2	2280	19.8
70 %	257	14.5	1.2	2268	19.0
75 %	258	14.5	1.1	2275	20.3
pesty 0-2 65 %	225	16.0	1.0	2318	21.5
70 %	227	16.0	1.1	2318	21.0
75 %	227	15.0	0.9	2310	19.6

10.1.2 Kovettuneen betonin ominaisuudet

Kuvissa 30 ja 31 on esitetty lattiabetoneiden puristuslujuuskokeiden tulokset 7 ja 28 vrk:n ikäisinä. Lujuustulokset on laskettu kolmen koekappaleen keskiarvona. Täydelliset koetulokset on esitetty liitteessä 3.



Kuva 30. K30 8 mm 1 sVB lattiabetonien puristuslujuudet 7 ja 28 vrk:n ikäisinä.



Kuva 31. K30 8 mm 1 sVB lattiabetonien puristuslujuudet 7 ja 28 vrk:n ikäisinä.

10.1.3 Koetulosten tarkastelu

Betonimassalla tehdyt kokeet

Lattiamassalla tehdyissä kokeissa tavoitepainuma oli 15.0 cm ja kokeissa painumat vaihtelivat 14.0 ja 16.0 cm:n välillä. Työstettävyyden heikentyminen oli kaikilla hiekoilla samankaltaista. Kahden tunnin kuluttua sekoituksesta painumat vaihtelivat 4.0 ja 7.0 cm:n välillä. Hiekkamäärillä ei ollut vaikutusta painuman pienentymiseen.

Massojen lämpötilat vaihtelivat 19.0 ja 21.5 °C välillä, joten lämpötilaerot eivät todennäköisesti vaikuttaneet kokeiden tuloksiin.

Hiekan hienoainesmäärän ja ilmapitoisuuden välillä on havaittavissa lievä korrelaatio. Runsaasti hienoainesta sisältävillä ilmamäärät ovat suurempia kuin vähän hienoainesta sisältävillä hiekoilla. Erot eivät kuitenkaan olleet suuria, ilmapitoisuudet vaihtelivat 0.9 ja 1.5 % välillä.

Työstettävyydeltään kaikilla hiekoilla saatiin hyviä massoja käyttämällä oikeita hiekkamääriä. Parhaat työstettävyyssominaisuudet luonnon hiekalla ja salaojasoran alitteella saatiin 70 % hiekkamääriä käyttäen ja pestyllä hiekalla 75 % hiekkamäärää käyttäen.

Luonnon hiekkaa käytettäessä vedentarve oli vertailuhiekan kanssa samalla tasolla. Vedentarve pienenee pestyllä hiekalla 2.6-4.2 % ja kasvaa 8.5-9.7 % eli 20-23 l/m³ salaojasoran alitteella vertailuhiekkaan verrattuna. Vedentarve lisääntyy vain lievästi hiekkamäärän kasvaessa.

Kovettuneella betonilla tehdyt kokeet

7 vrk:n ikäisenä puristuslujuudet olivat 26.9-30.2 MN/m² ja 28 vrk:n ikäisenä 35.9-39.9 MN/m². Puristuslujuuksissa ei

ollut suuria eroja eri hiekkatyypin välillä. 7 vrk:n ikäisenä salaojasoran alitteella ja 28 vrk:n ikäisenä vertailuhiekalla ja salaojasoran alitteella lujuudet olivat hieman muita alhaisemmat.

Hiekkamäärien ja puristuslujuuden välillä on havaittavissa selvä riippuvuus. Hiekkamäärän kasvaessa puristuslujuus pienenee kaikilla hiekkatyypeillä erojen ollessa 65 ja 75 % hiekkamäärillä 0.9-3.0 MN/m².

Kaikkia koehiekkkoja voidaan käyttää K30 lattiabetonin ainoana hienona runkoaineena. Työstettävyyssominaisuudet ovat hyvät käytettäessä oikeita hiekkamääriä. Puristuslujuudet ovat jopa paremmat kuin vertailubetonissa.

10.2 Huokostettu betoni K30

Huokostetulla betonilla tehdyissä kokeissa lujuusluokka oli K30. Maksimiraekoko oli 16 mm ja karkeana runkoaineena käytettiin 8-16 mm soraa. Kokeiden hiekkamäärinä käytettiin 40, 45 ja 50 % sekä vertailumassassa 47 %. Sementtimäärä kokeissa vaihteli 295 ja 330 kg/m³ välillä. Tavoitepainuma oli 100 ± 10 mm ja tavoiteilmamäärä 5.0 ± 0.5 %. Huokostimena kaikissa massoissa käytettiin vinsolhartsipohjaista Mischoel VR/T:tä. Huokostin lisättiin sekoituksen alussa myllyyn pieneen vesimäärään sekoitettuna. Ilmamäärä mitattiin 5 min kuluessa sekoituksesta. Kaikista massoista tehtiin myös kolme kpl 100*100*100 mm³ kuutioita pakkassuolakokeita varten. Jokaisesta hiekkatyypistä valittiin paras betoni 50 kierroksen pakkassuolakokeeseen, jonka perusteella kovettuneille betoneille laskettiin pakkasenkestävyysluku Tielaitoksen ohjeiden mukaan. Pakkassuolakokeet aloitettiin 28 vrk:n ikäisinä.

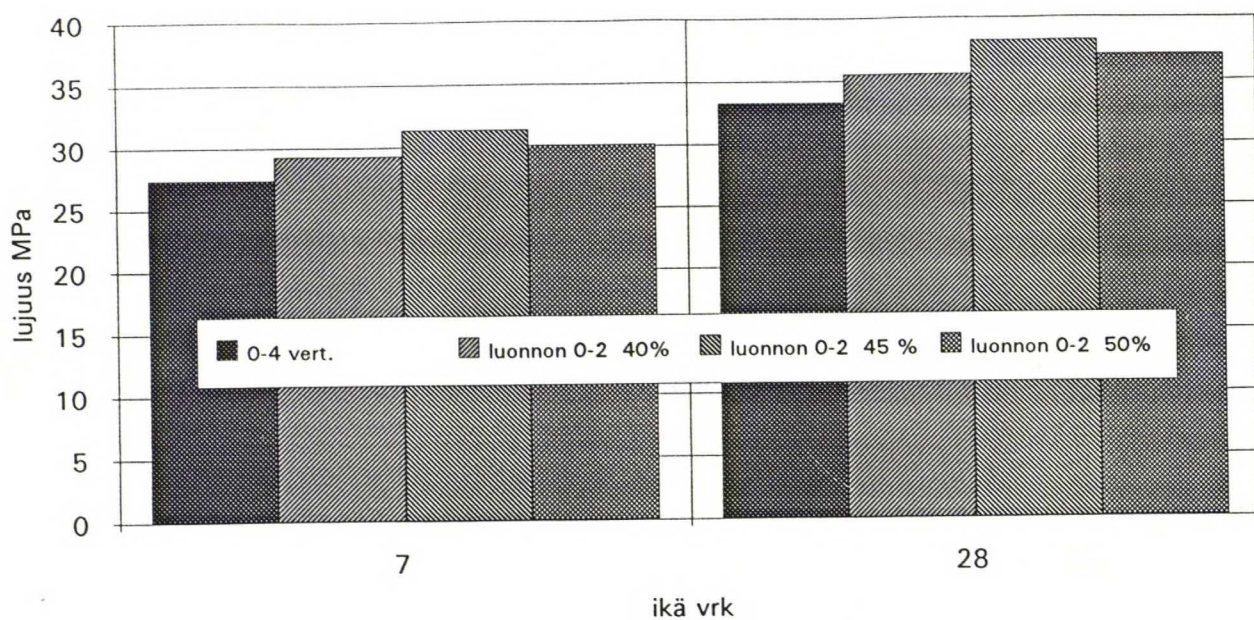
10.2.1 Betonimassan ominaisuudet

Taulukko 8. Betonimassojen vedentarve sekä ominaisuudet huokostetulla betonilla K30 16 mm 2 sVB.

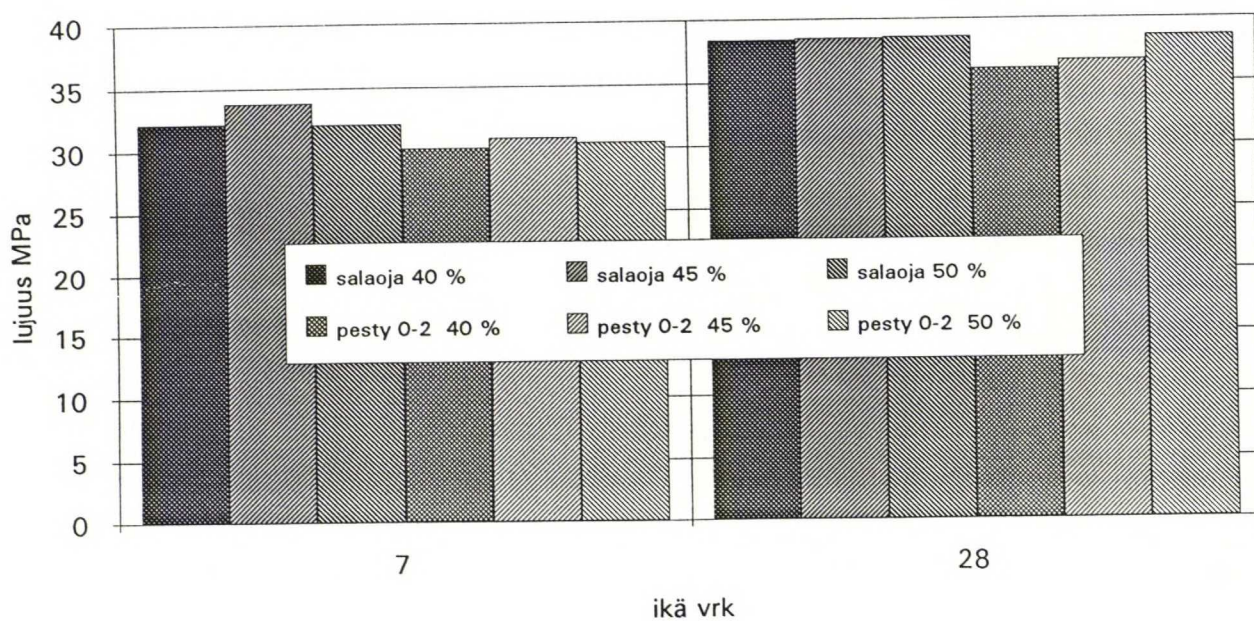
Hiekkatyyppi, hiekkamäärä runkoaineesta	Vesi (kg/m ³)	Painuma (cm)	Ilmamäärä (%)	Tiheys (kg/m ³)	L.tila (°C)
0-4 mm vert.	187	11.0	5.0	2283	21.9
luonnon 0-2					
40 %	184	11.5	4.5	2320	21.4
45 %	184	10.5	5.2	2300	21.0
50 %	186	10.5	5.4	2290	22.0
salaojasoran alite					
40 %	193	11.0	4.5	2320	20.2
45 %	192	10.5	5.0	2293	21.6
50 %	197	11.0	5.5	2278	19.7
pesty 0-2					
40 %	175	11.5	4.5	2300	21.5
45 %	176	11.0	5.0	2310	20.0
50 %	176	10.0	5.0	2335	22.1

10.2.2 Kovettuneen betonin ominaisuudet

Kuvissa 32 ja 33 on esitetty huokostettujen betonien puristuslujuuskokeiden tulokset 7 ja 28 vrk:n ikäisinä. Tulokset on laskettu kolmen koekappaleen keskiarvona. Täydelliset koetulokset on esitetty liitteessä 4.



Kuva 32. Huokostettujen K30 16 mm 2 sVB betonien puristuslujuudet 7 ja 28 vrk:n ikäisinä.



Kuva 33. Huokostettujen K30 16 mm 2 sVB betonien puristuslujuudet 7 ja 28 vrk:n ikäisinä.

Taulukossa 9 on esitetty pakkassuolakokeiden tulokset sekä niiden perusteella lasketut P-luvut Tielaitoksen sillanrakentamisen yleisen työselityksen 1992 mukaan. Sen mukaan 50 kierroksen pakkassuolakokeiden perusteella P-luku lasketaan kaavasta

$$P = k_v \cdot 200 / \text{DEV50}, \text{ jossa}$$

$k_v = 1 - 0.045 \cdot s - 0.008 \cdot k - 0.001 \cdot l$, missä s on silikan k masuunikuonan ja l lentotuhkan osuus sideaineesta (%). Tässä $k_v = 1.0$

DEV50 on pakkassuolakokeella todettu 50 kierroksen rapauma tilavuusprosentteina.

Taulukko 9. Pakkassuolakokeessa tapahtuneet tilavuudenmuutokset (%). Tulokset on ilmoitettu kolmen koekappaleen keskiarvona.

	Tilavuudenmuutos (%)			
	0-4 v 47%	0-2 l 45%	0-2 s 50%	0-2 p 50%
10 kierrosta	0.47	0.10	0.00	0.00
25 kierrosta	2.04	3.31	0.50	2.18
50 kierrosta	4.82	7.15	4.78	6.24
P-luku	41.5	28.0	41.8	32.1

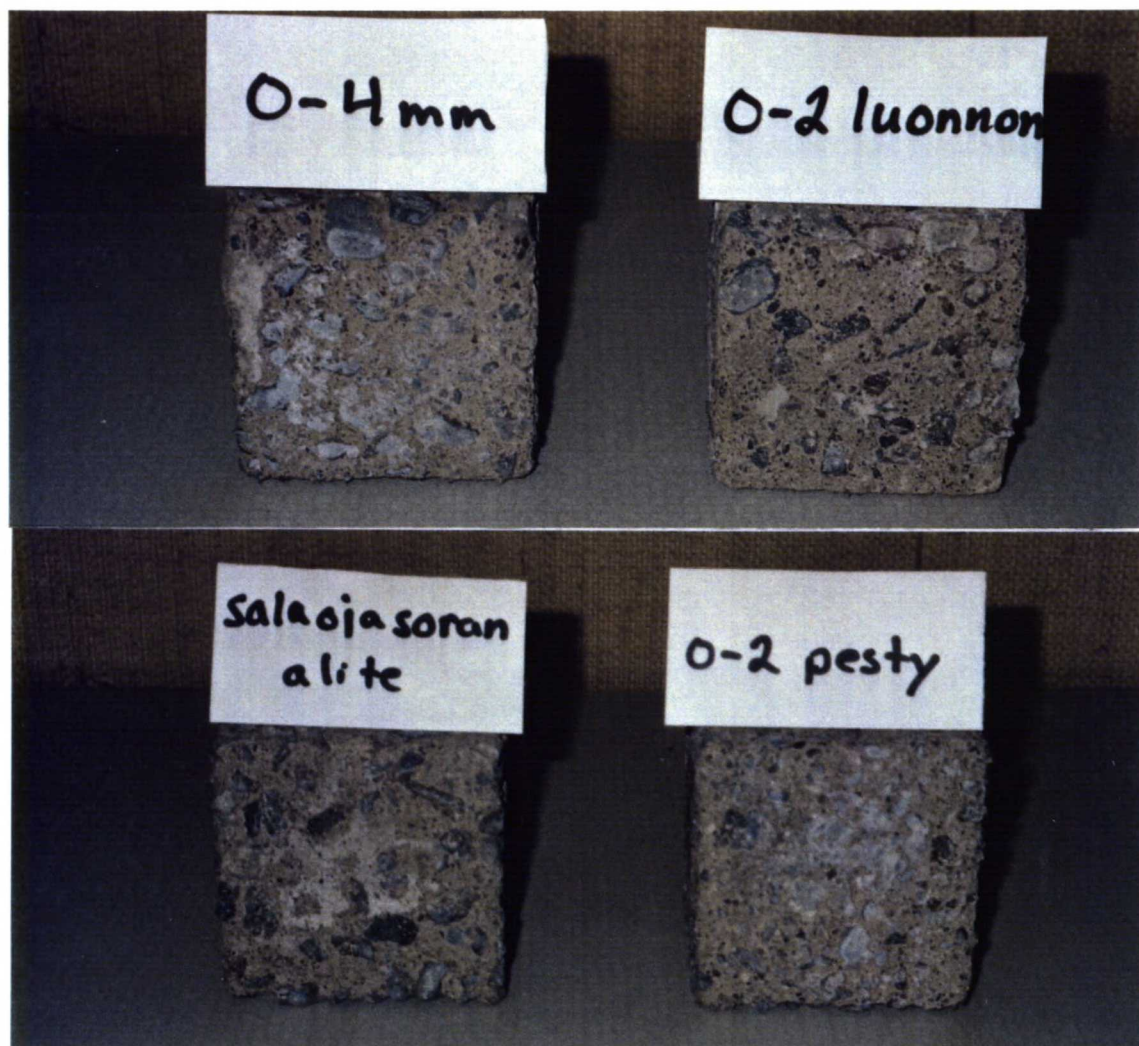
v on vertailuhiekka

l on luonnon 0-2 mm hiekka

p on pesty 0-2 mm hiekka

s on salaojasoran alite

Kuvassa 34 on esitetty koekappaleiden kuvat 50 kierroksen jälkeen.



Kuva 34. Koekappaleet 50 kierroksen pakkasuolakokeen jälkeen.

10.2.3 Koetulosten tarkastelu

Betonimassan ominaisuudet

Huokostetulla betonilla tehdyissä kokeissa tavoitepainuma oli 10.0 cm ja kokeissa painumat vaihtelivat 10.0 ja 11.5 cm:n välillä, joten notkeuserot eivät vaikuttaneet koetuloksiin.

Betonimassojen lämpötilat vaihtelivat 19.7 ja 22.1 °C välillä, joten tuloksia voidaan tältä osin pitää vertailukel-

poisina keskenään.

Kirjallisuusviitteiden mukaan hiekan hienoaineksen määrän noustessa kasvaa myös huokostinannostus. Kokeissa tavoiteilmamäärään päästiin kaikilla massoilla 0.05 % huokostinannostuksella sementin määrästä. Luonnon 0-2 mm hiekalla sekä salaojasoran alitteella ilmamäärät kasvoivat hiekkamäärän kasvaessa, mutta pestyllä hiekalla pienin ilmamäärä saatiin suurimmalla hiekkamäärällä.

Kaikkien massojen työstettävyys oli melko hyvä. Parhaat massat saatiin salaojasoran alitteella ja pestyllä hiekalla käyttämällä 50 % hiekkamäärää. Luonnon 0-2 mm hiekkaa käytettäessä paras massa saatiin 45 % hiekkamäärällä. 40 % hiekkamäärä oli kaikilla hiekkatyypeillä liian pieni ja massat olivat selvästi karkeita.

Hiekkojen aiheuttamassa vedentarpeessa oli selviä eroja. Vertailuhiekkaan nähden luonnon 0-2 mm hiekalla vedentarve oli 0.5-1.6 % pienempi, pestyllä hiekalla 5.9-6.4 % pienempi ja salaojasoran alitteella 2.6-5.3 % suurempi. Hiekkamäärän kasvattaminen lisäsi vedentarvetta vain lievästi.

Työstettävyys heikkeni kaikilla massoilla nopeasti. Suurilla hiekkamäärillä painuman pieneminen oli nopeampaa kuin pienillä hiekkamäärillä.

Kovettuneen betonin ominaisuudet

Betonien 7 vuorokauden puristuslujuudet olivat 27.4 ja 33.8 MN/m² välillä ja 28 vuorokauden lujuudet olivat 33.3 ja 38.6 MN/m² välillä. Alhaisimmat lujuudet kummassakin iässä olivat vertailubetonilla ja korkeimmat salaojasoran alitteella. Puristuslujuuksien ja hiekkamäärien välillä ei ollut riippuvuutta. Koska erot ilmamäärissä eri betoneilla olivat pienet, niiden vaikutukset puristuslujuuksiin olivat vähäisiä.

Pakkassuolakokeissa erot olivat erittäin suuria. 25 kierroksen jälkeen tilavuudenmuutokset olivat 0.50-3.31 %. Selvästi muita pienempi tilavuudenmuutos saatiin salaojasoran alitteella. 50 kierroksen jälkeen tilavuudenmuutokset olivat 4.8 ja 7.2 % välillä. Vertailuhiekan ja salaojasoran alitteen tuloksilla ei juuri ollut eroa ja ne olivat selvästi muita pienempiä. Tielaituksen ohjeiden mukaan lasketuilla P-luvuilla tarkasteltuna vertailuhiekalla sekä salaojasoran alitteella tehdyt betonit täyttävät P-40 vaatimukset, pestyllä hiekalla tehty betoni täyttää P-30 vaatimukset ja luonnon 0-2 mm hiekalla tehty betoni ainoastaan luokan P-20 vaatimukset.

Lujuuden ja pakkassuolakestävyys välillä ei ole tehtyjen kokeiden perusteella suoraa riippuvuutta, sillä vertailuhiekan puristuslujuus on koko ryhmän pienin ja pakkassuolakestävyys ryhmän paras.

10.3 Rakennebetoni K50

Viimeisen laboratoriokoesarjan kokeet tehtiin lujuusluokan K50 betonilla. Maksimiraekoko oli 16 mm ja karkeana runkoaineena käytettiin 8-16 mm soraa. Kokeissa hiekkamäärät olivat 30, 35 ja 40 % ja vertailubetonissa 38 %. Tavoitepainuma oli 10.0 ± 1.0 cm. Vesisideainesuhde pidettiin kokeissa vakiona. Sementtimäärät olivat 403-438 kg/m³ ja lentotuhkamäärät 109-119 kg/m³. Tehonotkistimen käytöllä sideaineiden määrää voitaisiin selvästi pienentää.

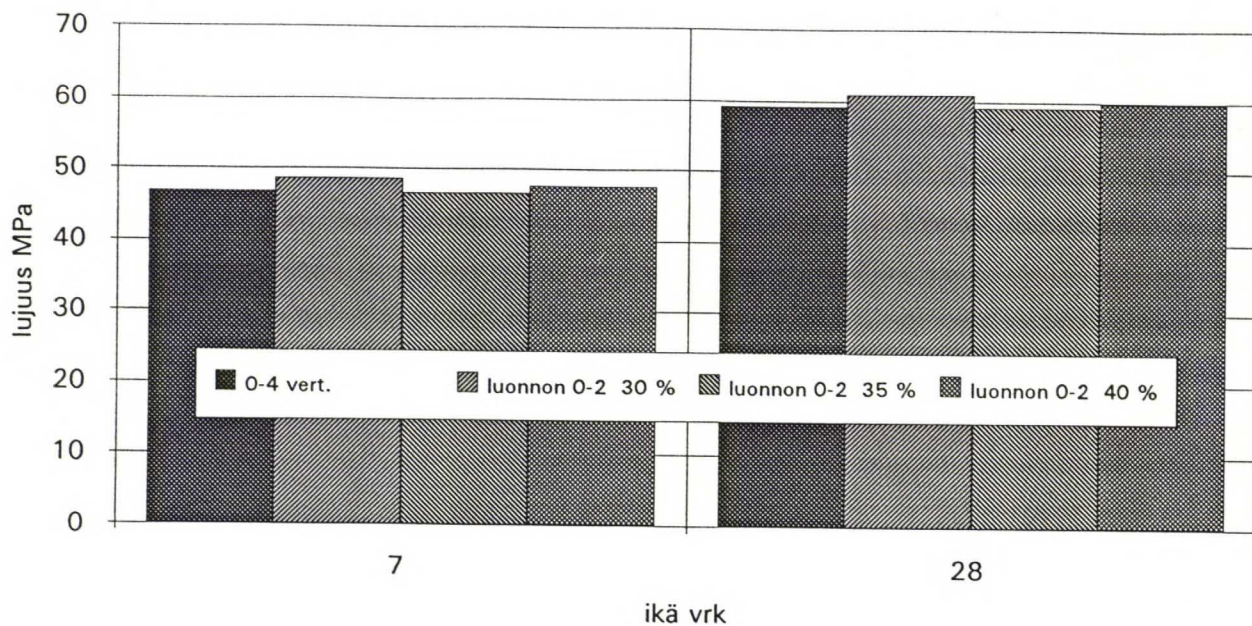
10.3.1 Betonimassan ominaisuudet

Taulukko 10. Betonimassojen vedentarve sekä ominaisuudet rakennebetonilla K50 16 mm 2 sVB.

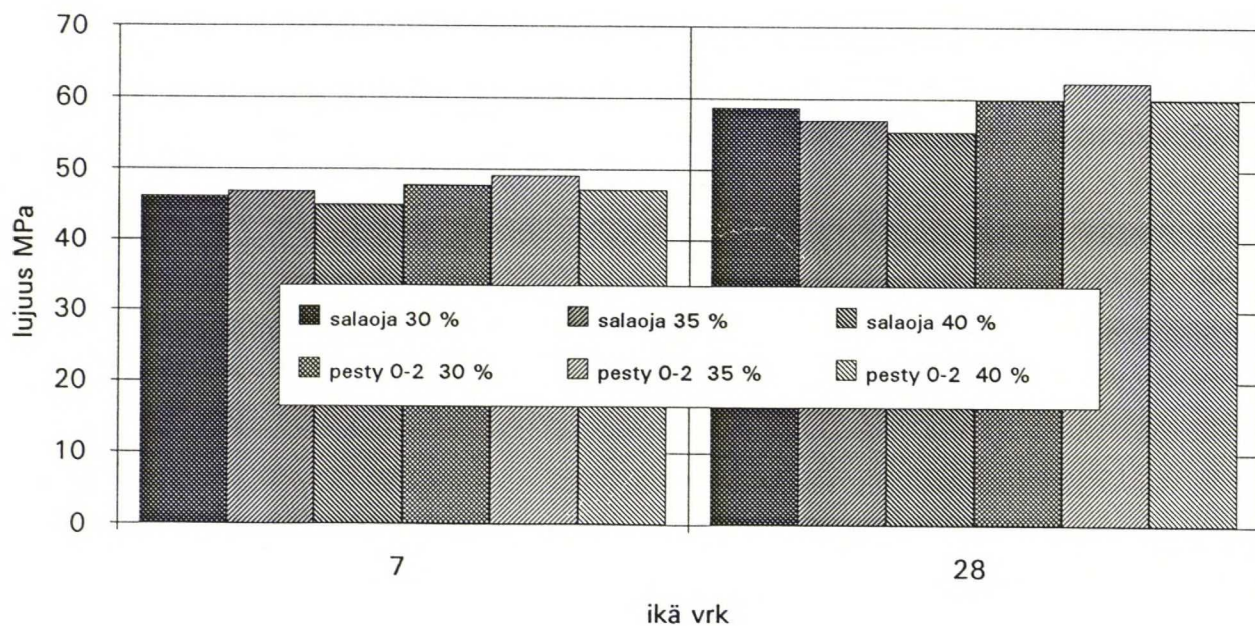
Hiekkatyyppi, hiekkamäärä runkoaineesta	Vesi (kg/m ³)	Painuma (cm)	Ilmamäärä (%)	Tiheys (kg/m ³)	L.tila (°C)
0-4 mm vert.	217	10.0	0.7	2380	19.6
luonnon 0-2					
30 %	221	10.5	0.7	2370	20.8
35 %	225	10.0	0.7	2375	21.0
40 %	230	10.0	0.6	2385	21.2
salaojasoran alite					
30 %	227	11.0	0.8	2370	21.3
35 %	228	10.0	0.9	2358	22.6
40 %	227	10.5	0.9	2353	22.3
pesty 0-2					
30 %	212	9.5	0.6	2398	20.3
35 %	211	9.5	0.7	2395	19.7
40 %	212	10.0	0.9	2390	20.1

10.3.2 Kovettuneen betonin ominaisuudet

Kuvissa 35 ja 36 on esitetty rakennebetonien K50 puristuslujuuskokeiden tulokset 7 ja 28 vrk:n ikäisinä. Tulokset on laskettu kolmen koekappaleen keskiarvona. Täydelliset koetulokset on esitetty liitteessä 5.



Kuva 35. K50 16 mm 2 sVB betonien puristuslujuudet 7 ja 28 vrk:n ikäisinä.



Kuva 36. K50 16 mm 2 sVB betonien puristuslujuudet 7 ja 28 vrk:n ikäisinä.

10.3.3 Koetulosten tarkastelu

Betonimassan ominaisuudet

Lujuusluokan K50 betoneissa tavoitepainuma oli 10.0 cm ja kokeissa painumat vaihtelivat 9.5 ja 11.0 cm:n välillä, joten tuloksia voidaan pitää vertailukelpoisina.

Lämpötilat olivat 19.6-22.3 °C, joten lämpötilaerot eivät todennäköisesti vaikuttaneet koetuloksiin.

Betonimassojen ilmapitoisuuksissa erot olivat erittäin pieniä ilmamäärien ollessa 0.6-0.9 %, eikä selviä riippuvuuksia ilma- ja hiekkapitoisuuden välillä ollut.

Hiekkamäärien muutos vaikutti selvästi työstettävyyssominaisuuksiin. 30 % hiekkamäärällä kaikki massat olivat erittäin kivisiä ja 40 % hiekkamäärällä massat olivat sitkeitä lukuunottamatta pestyllä hiekalla tehtyä, joka oli työstettävyydeltään koko koesarjan paras massa. Luonnon 0-2 mm hiekalla sekä salaojasoran alitteella 35 % hiekkamäärillä massat olivat työstettävyydeltään tyydyttäviä.

Luonnon 0-2 mm hiekalla vedentarve oli voimakkaasti riippuvainen hiekkamäärästä, 10 % hiekkamäärän lisäys aiheutti vedentarpeeseen 4.1 % kasvun. Vertailuhiekkaan nähden luonnon hiekalla vedentarve oli 1.8-6.0 % suurempi. Pestyllä hiekalla sekä salaojasoran alitteella vedentarve ei ollut riippuvainen hiekkamäärästä. Pestyllä hiekalla vedentarve oli 2.3-2.8 % vertailuhiekkaa pienempi ja salaojasoran alitteella 4.6-5.1 % vertailuhiekkaa suurempi.

Työstettävyyden heikkeneminen oli kaikilla massoilla nopeaa. Hiekkamäärän kasvattaminen pidensi työstettävyyss aikaa.

Kovettuneen betonin ominaisuudet

Puristuslujuudet vaihtelivat 7 vrk:n ikäisinä 45.0 ja 49.1 MN/m² välillä ja 28 vrk:n ljuuudet 55.4 ja 62.2 MN/m² välillä. Alhaisimmat ljuuudet saavutettiin salaojasoran alitteella ja korkeimmat pestyllä hiekalla. Hiekkamäärien ja ljuuksien välillä ei ollut havaittavissa riippuvuutta.

Koehiekoilla voidaan tehonotkististimia käyttämättä valmistaa työstettävyydeltään tyydyttävää betonia ljuusluokassa K50. Tehonotkistimien avulla työstettävyyssominaisuuksia voidaan parantaa, koska silloin sideainemääriä ovat pienemät. Tällöin voidaan käyttää suurempia hiekkamääriä massojen sitkistymättä.

11 TYÖMAAKOKEET

Työmaakokein pyrittiin selvittämään laboratoriokokeissa parhaimmiksi havaittujen betonimassojen käyttökelpoisuus työmaaolosuhteissa. Massatyypeiksi valittiin huokostettu- sekä lattiabetoni K30. Huomiota kiinnitettiin erityisesti betonimassojen pumpattavuuteen sekä kuljetuksen ja pump-pauksen aiheuttamaan ilmamäärän pienenemiseen huokostetuilla betonimassoilla. Betonimassojen käsiteltävyyttä pyrittiin selvittämään paitsi betonikokein myös kartoittamalla työmaa-henkilöstön mielipiteitä massojen laadusta.

11.1 Materiaalitiedot

Sideaineet

Työmaakokeissa käytettiin sideaineena Virkkalan nopeasti kovettuvaa sementtiä P 40/7 sekä lentotuhkaa.

Runkoaineet

Työmaakokeissa käytettiin hienoina runkoaineina luonnon 0-2 mm, pestyä 0-2 mm sekä huokostetussa betonissa myös salaoja-soran alitetta. Lattiabetoneissa jouduttiin käytännön jär-jestelyiden vuoksi karkeana runkoaineena käyttämään 4-8 mm soran sijasta pestyä hiekkaa 0-8 mm. Suhteituksia muutettiin siten, että yhdistettyjen runkoaineiden rakeisuusjakaumat olivat mahdollisimman yhdenmukaisia. Taulukossa 11 on esi-tetty työmaakokeissa käytettyjen runkoaineiden rakeisuusja-kaumat.

Taulukko 11. Työmaakokeissa käytettyjen runkoaineiden rakeisuusjakaumat sekä rakeisuusluvut H.

Lajite	Läpäisyprosentti									H
	.125	.25	.5	1	2	4	8	16	32	
0-2 l	5.8	26	58	81	95	98	100	100	100	764
0-2 p	2.2	23	60	80	91	99	100	100	100	755
0-2 s	4.5	20	44	75	96	99	100	100	100	739
0-8 p	1.3	7	18	33	47	70	97	100	100	573
8-16	0.5	1	2	3	7	16	26	86	100	342

l on luonnon hiekka

p on pesty hiekka

s on salaojasoran alite

Vesi ja lisäaineet

Kokeissa käytetty vesi oli Espoon kaupungin vesijohtovettä. Huokostimena käytettiin laboratoriokokeiden tavoin vinsolhartsipohjaista Mischoel VR/T.

11.2 Betonikokeet

Työmaakokeissa betonimassan valmistus tapahtui Lohja Oy:n Kauklahden valmisbetoniasemalla vapaapudotussekoittimella. Annosten koko vaihteli 4.0 ja 5.0 m³ välillä.

Jokaisen betonikokeen yhteydessä otettiin runkoaineista näytteet, joista määritettiin kosteus, humus- ja lietepitoisuudet sekä rakeisuusjakauma.

Massojen valmistuksen yhteydessä merkittiin ylös kaikki punnitut ainesosat. Näin pystyttiin määrittämään massojen todelliset koostumukset, jotka poikkesivat jonkin verran

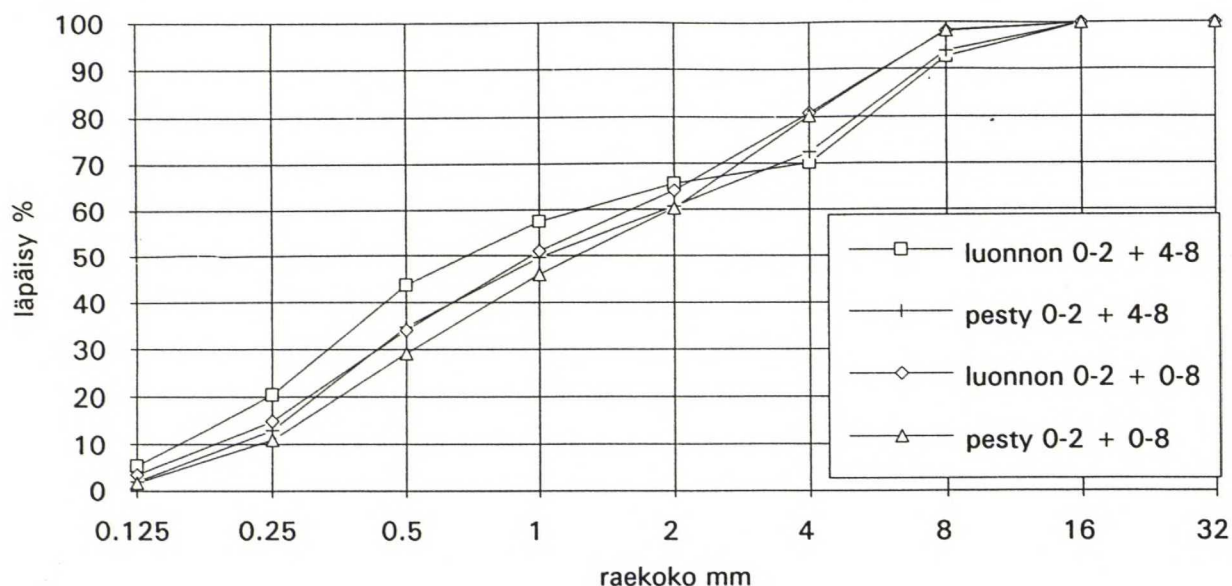
suhteitusten arvoista. Työmaakoemassojen punnitut ainesosat on esitetty liitteessä 6.

Ennen työmaalle kuljetusta massoista määritettiin painuma, tiheys, ilmapitoisuus sekä lämpötila. Lujuudenmäärittäystä varten valmistettiin betonitehtaan laboratoriossa kustakin koemassasta 6 kpl 150*150*150 mm³ kuutioita. Koekappaleet purettiin muoteista 1 vrk:n ikäisinä, jonka jälkeen niitä säilytettiin kosteushuoneessa. Lujuudet määritettiin 7 ja 28 vrk:n ikäisinä.

Koemassat kuljetettiin työmaalle pyörintäsäiliöautoissa niitä kuitenkaan sekoittamatta. Kuljetusmatkat vaihtelivat 4.0 ja 25.0 km välillä. Ennen purkausta massoja sekoitettiin jonkin aikaa. Työmailla massojen siirrot tehtiin pumppaamalla joko autobetonipumpulla tai betonipumpulla varustetulla pyörintäsäiliöautolla. Pumppausmatkat vaihtelivat 10.0 ja 20 m välillä. Pumppauksen jälkeen massoista otettiin näyte, josta määritettiin painuma, ilmapitoisuus sekä arvioitiin silmämääräisesti työstettävyyttä ja massojen laatua.

11.3 Lattiabetoni K30

Lattiabetonikokeissa käytettiin hienona runkoaineena luonnon 0-2 mm sekä pestyä 0-2 mm hiekkaa. Hiekkamäärä oli luonnon 0-2 mm hiekalla 37 % ja pestyllä 0-2 mm hiekalla 40 %. Karkeana runkoaineena käytettiin käytännön järjestelyiden vuoksi pestyä 0-8 mm hiekkaa poiketen laboratoriokokeista, joissa käytettiin 4-8 mm soraa. Kuvassa 37 on esitetty yhdistetyn runkoaineen rakeisuuskäyrät laboratorio- ja työmaakokeiden suhteituksille. Laboratoriokokeista poiketen lattiabetoneissa käytettiin 0.2 % sementin painosta huokostinta vedenerottumisen pienentämiseksi.



Kuva 37. Työmaa- ja laboratoriokokeissa käytettyjen yhdistettyjen runkoaineiden rakeisuuskäyrät lattiabetoneille.

11.3.1 Betonimassan ominaisuudet

Taulukko 12. Betonimassojen vedentarve sekä ominaisuudet lattiabetonilla K30 8 mm 1-2 sVB.

Hiekka- tyyppi	Painuma labor.	Painuma työmaa	Ilma % labor.	Ilma % työmaa	Tiheys kg/m ³)	L.tila (°C)
0-2 l 37 %	15.0 cm	15.0 cm	2.0	1.5	2298	17.9
0-2 p 40 %	13.0 cm	12.5 cm	2.2	2.0	2310	19.3

l on luonnon 0-2 mm hiekka

p on pesty 0-2 mm hiekka

11.3.2 Kovettuneen betonin ominaisuudet

Taulukko 13. K30 lattiabetoneiden tiheydet sekä puristuslujuudet 7 ja 28 vrk:n ikäisinä.

hiekkatyyppi	tiheys 7 vrk (kg/m ³)	lujuus 7 vrk (MN/m ²)	tiheys 28 vrk (kg/m ³)	lujuus 28 vrk (MN/m ²)
luonnon 0-2 37 %	2320	25.7	2331	34.8
pesty 0-2 40 %	2325	26.3	2330	35.8

11.3.3 Koetulosten tarkastelu

Molemmat massat olivat notkeudeltaan tavoitearvon mukaisia sekä laboratoriossa että työmaalla. Kuljetuksen ja pumppauksen aikana massojen notkeudessa ei tapahtunut oleellisia muutoksia.

0.02 % lisähuokostuksen ansiosta massojen ilmapitoisuudet olivat sekoituksen jälkeen 2.0 ja 2.2 %. Ilman huokostinta tehdyissä laboratoriokokeissa ilmapitoisuudet olivat noin 1.0 %. Työmaalla pumppauksen jälkeen ilmapitoisuudet olivat 1.5 ja 2.0 %.

Pumppaus työmaalla sujui ongelmitta. Työmaahenkilökunnan mukaan massojen työstettävyysominaisuudet eivät poikenneet normaaleista lattiamassoista.

Lujuuksiltaan betonit eivät eronneet toisistaan. 7 vrk:n puristuslujuudet olivat luonnon hiekalla 25.7 ja pestyllä hiekalla 26.3 MN/m². 28 vrk:n lujuudet olivat vastaavasti 34.8 ja 35.8 MN/m². Laboratoriokokeisiin verrattaessa lujuudet ovat hieman pienempiä, mutta myös punnitut sementtimäärät olivat suhteitusarvoja pienemmät.

Työmaakokeet osoittivat, että luonnon ja pestyllä 0-2 mm hiekalla voidaan valmistaa hyvin työstettävää K30 8 mm lat-tiabetonia.

11.4 Huokostettu betoni K30

Huokostettujen betonien valmistuksessa käytettiin hienoina runkoaineina 0-2 luonnon, pestyä 0-2 mm sekä salaojasoran alitetta. Karkeana runkoaineena käytettiin 8-16 mm soraa. Tavoitenotkeus oli 2-3 sVB ja tavoiteilmamäärä 4.0-6.0 %.

11.4.1 Betonimassan ominaisuudet

Taulukko 14. Betonimassojen vedentarve sekä ominaisuudet huokostetulla betonilla K30 16 mm 2-3 sVB.

Hiekka- tyyppi	Painuma labor.	Painuma työmaa	Ilma % labor.	Ilma % työmaa	Tiheys kg/m ³)	L.tila (°C)
0-2 l 45 %	11.0	10.0	5.1	4.5	2300	18.0
0-2 p 50 %	9.0	8.5	6.4	5.8	2290	17.0
0-2 s 50 %	12.0	12.0	5.4	4.8	2285	19.0

l on luonnon 0-2 mm hiekka

p on pesty 0-2 mm hiekka

s on salaojasoran alite

11.4.2 Kovettuneen betonin ominaisuudet

Taulukko 15. Huokostettujen betoneiden tiheydet sekä puristuslujuudet 7 ja 28 vrk:n ikäisinä.

hiekkatyyppi	tiheys 7 vrk (kg/m ³)	lujuus 7 vrk (MN/m ²)	tiheys 28 vrk (kg/m ³)	lujuus 28 vrk (MN/m ²)
luonnon 0-2 45 %	2325	28.7	2338	34.5
pesty 0-2 50 %	2341	30.1	2360	37.3
salaojasoran alite 50 %	2310	27.8	2335	33.8

11.4.3 Koetulosten tarkastelu

Luonnon 0-2 mm hiekkaa käytettäessä betonimassan laboratoriossa oli 11.0 cm. 20 km kuljetusmatkan ja pumppauksen jälkeen painuma oli pienentynyt 1.0 cm. Ilmamäärä oli 0.05 % huokostinannostuksella sekoituksen jälkeen 5.1 % ja työmaalla 4.5 %.

Salaojasoran alitetta käytettäessä painuma laboratoriossa ja työmaalla oli 12.0 cm. Massa oli muilla hiekoilla tehtyjä karkeampi. Ilmamäärä oli sekoituksen jälkeen 5.4 % ja ja 2 km kuljetuksen sekä pumppauksen jälkeen 4.8 %.

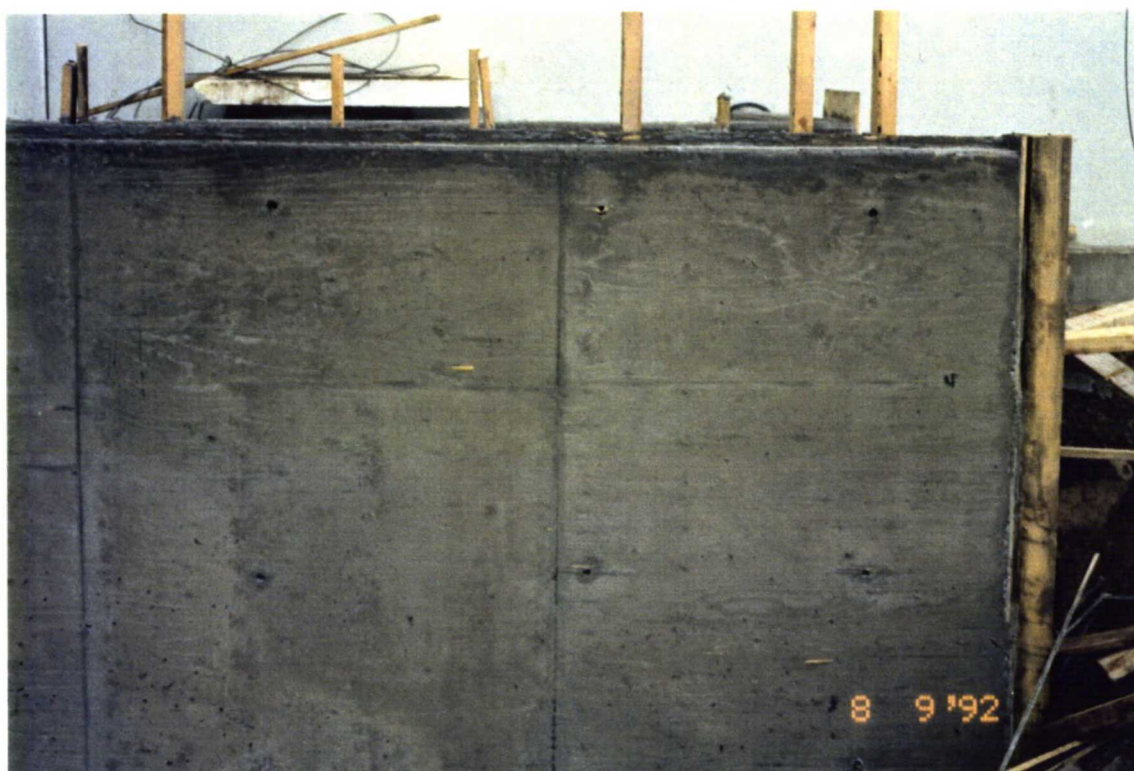
Pestyllä 0-2 mm hiekalla tehty huokostettu massa oli muita huokostettuja massoja jäykempää. Ilmamäärä oli 0.05 % huokostinannostuksella betoniasemalla 6.4 % ja työmaalla 5.8 %.

Massojen työstettävyyys- ja pumpattavuusominaisuudet olivat hyviä. Työmaahenkilökunnan mukaan luonnon 0-2 mm hiekalla tehty betoni oli työstettävyydeltään jopa normaaleja huokostettuja betoneita parempi. Kuvassa 38 on esitetty pestyllä

hiekillä tehdyn valun valupintaa.

Puristuslujuudet 7 vrk:n ikäsinä olivat 27.8-30.1 MN/m² ja 28 vrk:n ikäisinä 33.8-37.3 MN/m². Salaojasoran alitteella lujuudet olivat muita alemmat, mutta myös vesisementtisuhte punnittujen ainesosien mukaan oli muita suurempi. Kaikissa betoneissa punnitut sementtimäärät olivat suhteitusarvoja pienemmät. Erot olivat 4.0-10.0 kg/m³.

Työmaakokeet osoittavat, että kaikilla koehiekoilla voidaan valmistaa hyvää säänkestävää betonia lujuusluokassa K30.



Kuva 38. Valupinta huokostetulla K30 betonilla, kun hienona runkoaineena käytettiin pestyä hiekkaa.

12 TALOUDELLISUUSVERTAILU

0-2 mm lajitteet ovat nykyisin vähäisestä käytöstä johtuen halvempia kuin lajitteet 0-4 mm sekä 0-8 mm. Salaojasoran alite on salaojasoran seulonnessa saatava ylijäämätuote, joten sen hinta on muita lajitteita alhaisempi.

Kuljetuskustannusten osuus betonihiekan hinnasta on suuri. Niiden osuus hiekan hinnasta pääkaupunkiseudulla on 30-50 % hiekkatyypistä ja kuljetusmatkasta riippuen. Luonnon hiekan pesukustannukset ovat noin 10 % pääkaupunkiseudun betonitehtaille toimitetun hiekan hinnasta.

Taulukossa 16 on esitetty laskelmissa käytettyjen lajitteiden sekä sideaineiden suhteelliset hinnat 0-4 mm hiekkaan verrattuna. Hinnoissa on mukana keskimääräiset kuljetuskustannukset pääkaupunkiseudun betonitehtaille.

Taulukko 16. Eri runkoainelajitteiden sekä sideaineiden suhteelliset hinnat.

Lajite	suhteellinen hinta
0-2 mm luonnon	62.5
0-2 mm pesty	70.0
0-2 mm salaojasora alite	52.5
0-4 mm luonnon	100.0
4-8 mm sora	200.0
8-16 mm sora	100.0
sementti P40/7	950.0
lentotuhka	150.0
vesi	17.5
huokostin mk/kg	47.5

Betonien valmistuskustannukset laskettiin raaka-ainekustannusten perusteella. Taulukoissa 17-20 on esitetty laboratoriokokeissa tehtyjen betonien suhteelliset hinnat.

Taulukko 17. Normaalin rakennebetonin K30 16 mm 2 sVB suhteelliset hinnat ja 28 vrk:n puristuslujuudet.

hiekkatyyppi	hiekkamäärä	28 vrk lujuus MN/m ²	suhteellinen hinta
luonnon 0-2	35 %	36.4	111
	40 %	35.8	111
	45 %	34.9	110
pesty 0-2	35 %	33.9	109
	40 %	35.2	108
	45 %	34.1	100
salaojasoran alite	35 %	37.2	113
	40 %	35.7	111
	45 %	35.1	111

Taulukko 18. Lattiabetonin K30 8 mm 1 sVB suhteelliset hinnat ja 28 vrk:n puristuslujuudet.

hiekkatyyppi	hiekkamäärä	28 vrk lujuus MN/m ²	suhteellinen hinta
0-4 mm vert.	73 %	36.7	112
luonnon 0-2	65 %	39.9	107
	70 %	38.3	104
	75 %	36.9	102
pesty 0-2	65 %	39.7	105
	70 %	38.4	103
	75 %	37.2	100
salaojasoran alite	65 %	36.8	108
	70 %	36.2	106
	75 %	35.9	103

Taulukko 19. Huokostetun betonin K30 16 mm 2 sVB suhteelliset hinnat sekä 28 vrk:n puristuslujuudet.

hiekkatyyppi	hiekkamäärä	28 vrk lujuus MN/m ²	suhteellinen hinta
0-4 mm vert.	47 %	33.3	110
luonnon 0-2	40 %	35.5	103
	45 %	38.2	102
	50 %	37.0	101
pesty 0-2	40 %	36.1	101
	45 %	36.7	101
	50 %	38.6	100
salaojasoran alite	40 %	38.4	104
	45 %	38.5	103
	50 %	38.6	103

Taulukko 20. Rakennebetonin K50 16 mm 2 sVB suhteelliset hinnat sekä 28 vrk:n puristuslujuudet.

hiekkatyyppi	hiekkamäärä	28 vrk lujuus MN/m ²	suhteellinen hinta
0-4 mm vert.	38 %	59.3	105
luonnon 0-2	30 %	61.0	105
	35 %	59.2	104
	40 %	59.8	103
pesty 0-2	30 %	59.9	101
	35 %	62.2	100
	40 %	59.9	100
salaojasoran alite	30 %	58.7	105
	35 %	57.0	104
	40 %	55.4	103

Kuten hinnoista voidaan havaita, ovat pestystä hiekasta valmistetut betonimassat kaikissa betonityypeissä halvimmat johtuen muita selvästi pienemmästä vedentarpeesta ja sideainemäärästä. Erot vertailuhiekkaan ovat 3.9-10.6 %.

Salaojasoran alitteella tehdyt betonit ovat alitteen edullisemmasta hinnasta huolimatta kaikissa betonityypeissä muista koehiekoista tehtyihin betoneihin verrattuna kalliimpia. Syynä tähän on muita hieikkoja selvästi suurempi vedentarve ja sideainemäärät. Vertailuhiekkaan nähden salaojasoran alitteella betonin valmistuskustannukset alenevat 0.4-7.7 %.

Luonnon 0-2 mm hiekalla tehdyt betonit ovat valmistuskustannuksiltaan pestyn hiekan ja salaojasoran välillä. Vertailuhiekkaan nähden kustannusten aleneminen johtuu lajitteen halvemmasta hinnasta. Ero vertailuhiekan valmistuskustannuksiin on 0.4-8.7 %.

13 YHTEENVETO

Tässä tutkimuksessa selvitettiin erilaisten 0-2 mm hiekkalajitteiden käytön mahdollisuuksia valmisbetonin raaka-aineena. Lisäksi selvitettiin voidaanko betonin valmistuskustannuksia alentaa uusien lajitteiden käytön avulla.

Kirjallisuustutkimuksen mukaan runsaasti hienoainesta sisältävän hiekan käyttö kasvattaa betonin vedentarvetta mutta parantaa myös koossapysyvyyttä. Vedenerottumiseen hienolla hiekalla on vähentävä vaikutus, jos hiekassa on runsaasti hienoimpia alle 0.063 mm rakeita. Ilmapitoisuus kasvaa hiekan, mutta huokostetussa betonissa huokostimen teho pienenee hienoaineksien osuuden kasvaessa.

Kovettuneen betonin puristuslujuuteen hienoaineksien suurella määrällä ei ole juuri vaikutuksia, jos vesimäärää ei nosteta. Betonin kuivumiskutistuma kasvaa mikäli vesimäärää joudutaan lisäämään hienoaineksien suuren määrän johdosta.

Kokeellisessa osassa selvitettiin lajitteiden eri ominaisuudet. Kaikkien hiekkojen puhtaus täyttää Betonin kiviainesohjeiden 1990 vaatimukset. 20 % fillerinlisäys luonnon 0-2 mm hiekkaan kasvattaa tasaisesti rakeiden määrää 0.125 mm ja 1.0 mm välillä. Alle 0.125 mm alueella ei fillerinlisäys kasvattanut rakeiden määrää. Pestyssä 0-2 mm hiekassa ja salaojasoran alitteessa on selvästi vähemmän rakeita alueella 0.125-1.0 mm. 0.125 mm alitteessa pestyssä hiekassa on selvästi muita vähemmän hienoainesta ja salaojasoran alitteessa muita enemmän. Typpiadsorptiomenetelmällä määritetyt ominaispinta-alat vahvistavat tämän havainnon. Pesty kivituhka on rakeisuudeltaan selvästi muita karkeampi ja sen maksimiraekoko on 6.0 mm.

Salaojasoran alitteella on selvästi muita enemmän liuskeisia ja levymäisiä rakeita, jotka kasvattavat betonin vedentarvetta. Pesty hiekka on puhdasta ja levymäisiä rakeita on vähän. Luonnon 0-2 mm hiekalla pienet rakeet ovat suurelta

osin joko pyöreähköjä tai kuutiomaisia, jotka ovat betonin työstettävyyden kannalta edullisia.

Betonikokeissa eri hiekkojen vaikutuksia tutkittiin rakennebetonin K30, lattiabetonin K30, huokostetun betonin K30 sekä rakennebetonin K50 ominaisuuksiin. Rakennebetonilla K30 kokeet tehtiin kaikilla hiekoilla, mutta muilla betonityypeillä kokeet tehtiin luonnon 0-2 mm hiekalla, pestyllä hiekalla sekä salaojasoran alitteella. Lisäksi tehtiin vertailubetonit, joissa käytettiin 0-4 mm hiekkaa.

Työstettävyydeltään kaikilla hiekoilla saatiin vertailubetonin tasolla olevia massoja, lukuunottamatta pestyä kivituhkaa. Hyvään työstettävyyteen pestyllä 0-2 mm hiekalla jouduttiin käyttämään noin 5 % muita hiekkoja suurempia hiekkamääriä johtuen muita pienemmästä hienoainespitoisuudesta. Pestyllä kivituhkalla tehtyjen massojen huono työstettävyys johtui ilmeisesti huonosta raemuodosta sekä liian pienestä raemäärästä alueella 0.125-1.0 mm. Pestyn kivituhkan käyttö betonin valmistuksessa vaatii hienoksi runkoaineksi myös murskaamattomia rakeita.

Vedentarpeessa kokeiden hiekoilla oli suuria eroja. Luonnon 0-2 mm hiekalla vedentarve oli 0-4 mm hiekkaan nähden 1.8-6.0 % suurempi, paitsi huokostetussa betonissa, jossa vedentarve oli 0.5-1.6 % vertailuhiekkaa pienempi. Pestyllä hiekalla vedentarve oli kaikissa betonityypeissä vertailuhiekkaa selvästi pienempi. Erot olivat 2.3-6.4 %. Salaojasoran alitteella vedentarve oli kaikissa kokeissa kaikkein suurin. Erot vertailuhiekkaan olivat 2.6-9.7 %. Lattiabetoneissa vedentarpeen erot olivat suurimmat johtuen muita betonityyppejä selvästi suuremmista hiekkamääristä.

Syyt vedentarpeen eroihin ovat ilmeisesti raemuodon lisäksi myös hienoaineksen määrässä. Pelkästään 0.125 mm läpäisyarvon tarkastelu ei anna oikeaa kuvaa vedentarpeesta, vaan täytyy tutkia myös 0.125 mm alitteen rakeisuusjakauma. Salaojasoran alitteella 0.125 mm läpäisyarvo oli koehiekkojen

toiseksi pienin, mutta siinä oli selvästi muita enemmän erittäin hienoja alle 0.063 mm rakeita.

Huokostamattomien betonien ilmapitoisuus kasvaa hieman hiekkamäärien kasvaessa. Erot ovat kuitenkin pieniä. Huokostetuissa betoneissa ei havaittu kirjallisuudessa esitettyä väitettä, jonka mukaan hienoainespitoisuuden kasvaessa huokostimen teho pienenee. Tehdyissä kokeissa samalla huokostinmäärällä suurimmat ilmapitoisuudet olivat massoissa, joissa käytettiin suurimpia hiekkamääriä. Kaikilla hiekoilla tavoiteilmamäärä saavutettiin 0.5 % huokostinannostuksella sementin määrästä.

Koska vesisideainesuhteet pidettiin vakioina, ei puristuslujuuksissa ollut suuria eroja eri hiekkojen välillä. Puristuslujuudet eivät yleensä olleet riippuvaisia käytetyistä hiekkamääristä. Ainoastaan lattiabetoneilla lujuudet pienenevät hiekkamäärien kasvaessa. Salaojasoran alitteella lujuudet olivat yleensä hieman muita pienempiä.

Huokostetun betonin pakkassuolakokeissa erot tuloksissa olivat suuret. Ainoastaan vertailuhiekalla sekä salaojasoran alitteella tehdyt betonit täyttivät P-40-luokan vaatimukset. Pestyllä hiekalla tehty betoni täytti luokan P-30 vaatimukset ja luonnon 0-2 hiekalla ainoastaan luokan P-20 vaatimukset täyttyivät. Betoneissa ei tosin tehty vedenvähennystä, jolla pakkassuolakestävyyttä voidaan parantaa.

Työmaakokeissa testattiin laboratoriokokeiden parhaiden massojen toimivuutta käytännön olosuhteissa. Huokostetut betonit tehtiin luonnon 0-2 mm hiekalla, pestyllä hiekalla sekä salaojasoran alitteella. Lattiabetonit tehtiin luonnon 0-2 mm sekä pestyllä hiekalla. Tulokset olivat rohkaisevia. Työstettävyyys- ja pumpattavuusominaisuudet olivat hyviä, eikä huokostettujen massojen ilmamäärissä tapahtunut normaalia suurempaa ilmamäärän pienenemistä kuljetuksen ja pumpauksen aikana. Myös lujuustulokset olivat hyviä, joskin ne olivat hieman laboratoriokokeiden tuloksia alhaisempia.

Taloudellisuusvertailussa pestyllä hiekalla tehdyt betonit osoittautuvat kaikissa betonityypeissä muita hiekkoja edullisemmaksi. Erot raaka-ainekustannuksissa vertailuhiekkaan nähden olivat 3.9-10.6 %. Syyt muita pienempiin kustannuksiin ovat pienemmät sideainemäärät sekä lajitteen vertailuhiekkaa alhaisempi hinta. Myös luonnon 0-2 mm hiekalla sekä salaojasoran alitteella raaka-ainekustannukset ovat vertailuhiekkaa alhaisemmat. Näiden kohdalla kustannusten aleneminen johtuu pääosin lajitteiden vertailuhiekkaa alhaisemmasta hinnasta. Salaojasoran alitteella muita suuremman vedentarpeen johdosta myös sideainemäärät ovat muita suuremmat, mutta myös sen hinta ylijäämätuotteena on muita alhaisempi.

Tämän tutkimuksen mukaan kaikki jatkokeisiin valitut hiekat soveltuvat valmisbetonin raaka-aineeksi. Niiden käyttö on myös taloudellisesti järkevää. Myös salaojasoran alitteen kohdalla sen käyttö betonin raaka-aineena olisi eräs järkevä käyttökohde muita korkeammista sideainemääristä huolimatta, koska nykyisin se on ylijäämätuote, jolle ei ole taloudellisesti järkevää hyötykäyttöä.

Jatkossa tulisi selvittää hienojen lajitteiden käytön vaikutukset notkistetuissa betonimassoissa, koska tässä tutkimuksessa ei käytetty notkistimia. Notkistimien käytöllä voitaisiin alentaa salaojasoralla valmistettujen betonien veden tarvetta ja sideainemääriä. Myös keinot, joilla pakkassuola-kestävyyttä saadaan parannettua, pitäisi tutkia. Tässä tutkimuksessa ei käsitelty yli 50 MN/m² betoneita, mutta hienojen hiekkojen käyttö myös niiden runkoaineena tulisi selvittää.

KIRJALLISUUSLUETTELO

ACI Committee Report no. ACI 221 R. Guide for use of normal weight aggregates in concrete. 1984. Journal of the American Concrete Institute Vol 81, No 2. s. 115-139.

Ahmed, E.A. & El-Kour, A.A., 1989. Properties of concrete incorporating natural and crushed stone very fine sand. ACI Materials Journal Vol 86, No 4. s. 417-424.

Banfill, P.F.G., 1983. Fine aggregates for concrete from the Mersey estuary. CIB 83, Vol 4, s. 53-63.

Banfill, P.F.G. & Carr, M.P. 1987. The properties of concrete made with very fine sand. Concrete, Vol 21, No 3. s. 11-16.

Bloem, D.L. & Gaynor, R.D. 1963. Effects of aggregate properties on strength of concrete. Journal of American Concrete Institute. Vol 60, No 10. s. 1429-1454.

Ertingshausen, H. 1988. Beton aus sandreichen Korngruppen. Betonwerk + Fertigteil-Technik, Vol 54, No 11. s. 64-72.

Fulton, F.S. 1977. Concrete Technology. The Portland Cement Institute. Johannesburg. 407 s.

Järvi, M. 1991. Mikrosuhteitusten vaikutus betonin ominaisuuksiin. Lisensiaattityö. Teknillinen Korkeakoulu. 128 s.

Kilian, G. 1990. Einflussnahme über den Mehlkorngesamt im Zuschlag auf die Betongüte. Betonwerk + Fertigteil-Technik, Vol 54, No 2. s. 75-79.

Malhotra, V.M. & Carrette G.G. 1985. Performance of concrete incorporating limestone dust as partial replacement for sand. Journal of the American Concrete Institute, Vol 82, No 3, s. 363-371

Matala, S. 1987. Mix design of concrete for the Kingdom of Saudi Arabia, Part II. Saudi Arabia Standards Organization. 134 s.

Murdock, L.J. 1979. Concrete materials and practise. 5. p. London. Edward Arnold Publishers Ltd. 434 s.

Neville, A.M. 1981. Properties of concrete, 3rd edition. London, Pitman Publishing Limited. 779 s.

Nichols, F.P. 1982. Manufactured sand and crushed stone in Portland cement concrete. Concrete International, Vol 4, No 8. s. 56-63.

Penttala, V., Rautanen, T., Alkula, R., Ipatti, A. 1986. Rakeisuudeltaan epäjatkuvan runkoaineen vaikutus betonin ominaisuuksiin. Teknillinen Korkeakoulu. Julkaisu 78. Espoo. 109 s.

Poijärvi, H. 1966. Kiviaineksen hienojakoisimman osan vaikutuksista betonin ominaisuuksiin. Valtion teknillinen tutkimuslaitos. Julkaisu 110. Helsinki. 197 s.

Schäper, M. 1987. Splittbeton mit Brechsand - eine Macharbeitsstudie. Betonwerk + Fertigteil-Technik. Vol 53, No 11. s. 757-763.

SFS. 1988. SFS Käsikirja 100, Betonistandardit, 317 s.

Springenschmid, R. & Breitenbücher, R. & Setzer, M.J. 1987, Luftporenbeton - Neuere Untersuchung zur Feinstsandzusammensetzung, Liegezeit und Nachdosierung von Luftporenbildern. Betonwerk + Fertigteil-Technik, Vol 53, No 11. s. 742-748.

Suomen Betoniyhdistys ry. 1990. Betonin kiviainesohjeet. Julkaisu BY 33. 39 s.

Suomen Rakennusinsinöörien Liitto. 1979. Betonitekniikka. RIL 119. Helsinki. 471 s.

Tattersall, G.H. 1976. The workability of concrete. Slough, Cement and Concrete Association. 138 s.

Tielaitos. 1992. Sillanrakentamisen yleinen työselitys.

Wills, M.H. 1967. How aggregate particle shape influences concrete mixing water requirement and strength. Journal of materials. Vol 2, No 4. s. 843-865.

Ylikoski, K. 1985. Fillerimateriaalin vaikutuksista laastin ominaisuuksiin. Diplomityö. Tampereen teknillinen korkeakoulu. Rakennustekniikan osasto. 68 s.

SIDEAINEIDEN ANALYYSITULOKSET

KEMIALLINEN ANALYYSIP40/7

SiO ₂	19.4
Al ₂ O ₃	4.5
Fe ₂ O ₂	2.6
MgO	3.6
CaO	59.7
SO ₃	3.5
CO ₂	1.5

FYSIKAALISET OMINAISUUDET

	<u>P40/7</u>	<u>Lentotuhka</u>
Omin.paino g/cm ³	3.11	2.25
Omin.pinta-ala m ² /kg	456	273
Sitoutumisaika min.	160	
Hehkutushäviö %		4.2

Puristuslujuus MN/m²

1d	27 MPa
3d	41 MPa
7d	45 MPa

K30 16 mm 2 svb suhteitukset, massan sekä kovettuneen betonin ominaisuudet

hiekkä %	0-2 luonnon			0-2 + 20 % fil.			0-2 pesty			salaajasoran alite		
	35 %	40 %	45 %	35 %	40 %	45 %	35 %	40 %	45 %	35 %	40 %	45 %
hiekkä (kg)	618	706	795	618	707	792	649	747	835	603	690	776
sora (kg)	1148	1060	971	1149	1060	929	1206	1117	1020	1121	1034	948
sementti P40/7	229	229	229	229	229	231	207	207	207	243	243	243
lentotuhka	118	118	118	118	118	119	107	107	107	125	125	125
vesi	204	206	208	207	209	208	188	187	187	215	218	220
vesi/sid	0.772	0.779	0.786	0.782	0.790	0.780	0.786	0.782	0.782	0.766	0.777	0.784
painuma (cm)												
0 min	11.0	11.5	11.0	11.0	9.5	9.0	10.0	11.5	10.0	11.5	11.5	10.0
30 min	7.0	9.0	8.0	8.5	7.0	7.0	6.0	7.5	7.5	9.5	9.5	7.5
60 min	6.0	8.0	7.0	8.0	6.5	6.0	5.0	7.0	6.5	9.5	8.0	6.5
90 min	5.0	7.0	6.0	8.0	6.0	5.5	-	6.0	5.5	9.0	7.5	6.0
120 min	-	6.5	5.0	6.5	5.0	5.0	-	5.0	4.5	8.5	6.5	5.0
ilmapitoisuus (%)												
lämpötila °C	0.5	0.6	0.9	0.6	0.9	0.8	0.4	0.7	0.9	0.6	0.7	1.0
	18.5	17.5	17.2	16.8	18.8	17.8	18.0	17.9	17.0	19.8	16.5	17.9
lujuus (MPa)												
hajonta s												
7 d	25.7	25.4	25.8	25.0	26.2	25.5	23.8	24.5	24.0	25.5	24.3	25.0
s	0.12	0.26	0.57	0.00	0.10	0.31	0.23	0.31	0.67	0.16	0.42	0.10
28 d	36.4	35.8	34.9	36.7	37.4	36.5	33.9	35.2	34.1	37.2	35.7	35.1
s	0.59	0.26	0.40	0.45	0.30	0.12	0.21	0.26	0.22	0.61	0.22	0.08
tiheys (kg/dm ³)												
7 d	2.380	2.380	2.368	2.385	2.378	2.368	2.408	2.403	2.393	2.373	2.355	2.348
28 d	2.389	2.393	2.378	2.398	2.385	2.380	2.431	2.416	2.406	2.378	2.360	2.366
	2.404	2.406	2.380	2.400	2.394	2.392	2.430	2.424	2.418	2.382	2.374	2.372

K30 8 mm 1 svb lattiat betonin suhteitukset, massan sekä kovettuneen betonin ominaisuudet

LIITE 3

hiekkä %	0-4 v		0-2 luonnon			0-2 pesty			salaajasan alite		
	73 %		65 %	70 %	75 %	65 %	70 %	75 %	65 %	70 %	75 %
hiekkä (kg)	1227		1073	1156	1283	1102	1187	1271	1021	1100	1178
sora (kg)	454		578	495	413	593	508	424	550	471	393
sementti P40/7	304		312	312	312	299	299	299	338	338	338
lentotuhka	70		72	72	72	69	69	69	78	78	78
vesi	235		238	239	240	225	227	229	255	257	258
vesi/sid	0.723		0.713	0.716	0.719	0.704	0.710	0.716	0.706	0.711	0.714
painuma (cm)											
0 min	15.0		15.0	14.0	14.0	16.0	16.0	15.0	15.0	14.5	14.5
30 min	11.0		11.0	8.0	9.0	11.5	12.0	11.0	12.0	13.0	10.5
60 min	7.5		8.0	6.5	7.0	10.5	10.5	9.5	10.0	10.0	9.0
90 min	6.0		6.0	5.5	5.5	9.5	9.0	8.5	8.0	7.5	8.0
120 min	4.5		5.0	4.0	4.0	6.5	7.0	6.5	6.5	5.5	6.0
ilmapitoisuus (%)											
lämpötila °C	1.2		1.1	1.5	1.4	1.0	1.1	0.9	1.2	1.2	1.1
	22.5		20.0	21.5	20.0	21.5	21.0	19.6	19.8	19.0	20.3
lujuus (MPa)											
hajonta s											
7 d	28.6		30.0	29.1	28.1	30.2	28.2	28.1	28.2	26.9	26.9
s	0.50		0.55	0.06	0.15	0.40	0.21	0.57	0.06	0.31	0.12
28 d	36.7		39.9	38.3	36.9	39.7	38.4	37.2	36.8	36.2	35.9
s	0.15		0.31	0.31	0.53	0.17	0.21	0.42	0.60	0.50	0.44
tiheys (kg/dm³)											
7 d	2.310		2.303	2.300	2.295	2.318	2.318	2.310	2.280	2.268	2.275
	2.325		2.333	2.319	2.319	2.349	2.335	2.325	2.295	2.289	2.280
28 d	2.331		2.349	2.274	2.327	2.360	2.335	2.337	2.300	2.303	2.289

Huokostetun K30 16 mm 2 svb suhteitukset, betonimassan sekä kovettuneen betonin ominaisuudet

LIITE 4

hiekkä %	0-4 v 47 %	0-2 luonnon			0-2 pesty			salaajatoran alite		
		40 %	45 %	50 %	40 %	45 %	50 %	40 %	45 %	50 %
hiekkä (kg)	832	702	782	877	726	817	908	693	779	866
sora (kg)	938	1052	965	877	1089	998	908	1039	953	866
sementti P40/7	315	313	313	313	295	295	295	330	330	330
vesi	187	184	184	186	175	176	176	193	192	197
vesi/sem	0.594	0.588	0.588	0.594	0.593	0.597	0.597	0.585	0.582	0.597
painuma (cm)										
0 min	11.0	11.5	10.5	10.5	11.5	11.0	10.0	11.0	10.5	11.0
30 min	8.5	9.0	8.0	7.0	8.0	7.0	6.0	8.5	7.5	6.5
60 min	6.5	6.5	5.5	5.0	6.0	4.5	4.0	6.5	4.5	4.5
90 min	4.5	5.0	4.0	-	5.0	-	-	4.5	-	-
huok.annostus (%)	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
ilmapitoisuus (%)	5.0	4.5	5.2	5.4	5.0	5.0	4.6	4.5	5.0	5.5
lämpötila °C	21.9	21.4	21.0	22.0	21.5	20.0	22.1	20.2	21.6	19.7
pakkasuolakoe (%)										
25 r	2.1	-	3.3	-	-	-	2.2	-	-	0.5
50 r	4.8	-	7.2	-	-	-	6.2	-	-	4.8
lujuus (MPa)										
hajonta s										
7 d	27.4	29.3	31.4	30.1	30.1	30.9	30.5	32.2	33.8	32.1
s	0.19	0.19	0.43	0.23	0.39	0.14	0.29	0.50	0.26	0.54
28 d	33.3	35.5	38.2	37.0	36.1	36.7	38.6	38.4	38.5	38.6
s	0.21	0.06	0.90	0.52	0.35	0.66	0.53	0.87	0.51	0.31
tiheys (kg/dm ³)										
7 d	2.283	2.320	2.300	2.290	2.300	2.310	2.335	2.320	2.293	2.278
28 d	2.319	2.347	2.331	2.341	2.380	2.370	2.357	2.341	2.356	2.315
	2.339	2.365	2.343	2.351	2.370	2.368	2.361	2.354	2.347	2.321

K50 16 mm 2 svb suhteitukset, massan sekä kovettuneen betonin ominaisuudet

hiekkä %	0-4 v		0-2 luonnon				0-2 pesty			salaajasoran alite		
	38 %		30 %	35 %	40 %		30 %	35 %	40 %	30 %	35 %	40 %
hiekkä (kg)	606		464	542	619		487	568	649	460	536	613
sora (kg)	989		1084	1006	929		1135	1054	973	1073	994	920
sementti P40/7	413		432	432	432		403	403	403	438	438	438
lentotuhka	112		117	117	117		109	109	109	119	119	119
vesi	217		221	225	230		212	211	212	227	228	227
vesi/sid	0.486		0.473	0.482	0.492		0.487	0.484	0.487	0.479	0.481	0.479
painuma (cm)												
0 min	10.0		10.5	10.0	10.0		9.5	9.5	10.0	11.0	10.0	10.5
30 min	6.0		5.5	6.5	7.0		5.5	6.5	6.5	6.5	6.0	7.5
60 min	4.0		4.0	5.5	5.5		3.5	4.0	5.5	5.5	5.0	5.5
90 min	-		-	4.5	4.5		-	-	4.5	4.0	-	4.5
ilmapitoisuus (%)												
lämpötila °C	0.7		0.7	0.7	0.6		0.6	0.7	0.9	0.8	0.9	0.9
	19.6		20.8	21.0	21.2		20.3	19.3	20.1	21.3	22.6	22.3
lujuus (MPa)												
hajonta s												
7 d	46.8		48.6	46.6	47.6		47.8	49.1	47.2	46.2	46.9	45.0
s	0.70		0.45	0.96	0.65		0.12	0.58	0.57	0.50	2.01	0.21
28 d	59.3		61.0	59.2	59.8		59.9	62.2	59.9	58.7	57.0	55.4
s	0.95		0.68	0.55	0.92		0.20	0.97	0.46	0.40	0.60	1.05
tiheys (kg/dm³)												
7 d	2.380		2.370	2.375	2.385		2.398	2.395	2.390	2.370	2.358	2.353
28 d	2.404		2.388	2.384	2.404		2.422	2.424	2.418	2.384	2.374	2.374
	2.412		2.394	2.396	2.416		2.426	2.424	2.426	2.390	2.380	2.384

Työmaakokeiden punnitut ainesosat, massan sekä kovettuneen betonin ominaisuudet

	lattiabetoni K30 8 mm 1-2 SVB		huokostettu K30 16 mm 2-3 SVB		
	luonnon 0-2 37 %	pesty 0-2 40 %	luonnon 0-2 46 %	pesty 0-2 51 %	salaojasoran alite 50 %
hiekkä %					
hiekkä (kg)	609	660	820	945	873
sora (kg)	1045	990	952	888	869
sementti P40/7	308	295	305	291	320
lentotuhka	75	80	-	-	-
vesi	233	225	185	175	198
vesi/sid	0.704	0.705	0.601	0.601	0.619
painuma (cm)					
laboratorio	15.0	13.0	11.0	9.0	12.0
työmaa	15.0	12.5	10.0	8.5	12.0
ilmapitoisuus (%)					
laboratorio	2.0	2.2	5.1	6.4	5.4
työmaa	1.5	2.0	4.5	5.8	4.8
lämpötila °C	17.9	19.3	18.0	17.0	19.0
lujuus (MPa)					
hajonta s					
7 d	25.7	26.3	28.7	30.1	27.8
s	0.79	0.35	0.72	0.27	0.89
28 d	34.8	35.8	34.5	37.3	33.8
s	0.45	0.51	0.34	0.62	0.68
tiheys (kg/dm ³)					
7 d	2.298	2.310	2.300	2.290	2.285
	2.320	2.325	2.325	2.341	2.310
28 d	2.331	2.332	2.338	2.356	2.330

Vesa Penttala